

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Um Sistema de Geração  
de Trajetórias de  
Ferramentas em 3 Eixos**

por

**LEANDRO COSTA DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida à avaliação como requisito parcial para  
a obtenção do grau de Mestre em  
Ciência da Computação

Prof. Anatólio Laschuk  
Orientador



Porto Alegre, maio de 1997

**UFRGS**  
**INSTITUTO DE INFORMÁTICA**  
**BIBLIOTECA**

**CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO**

Oliveira, Leandro Costa de

Um Sistema de Geração de Trajetórias de Ferramentas em 3 Eixos / Leandro Costa de Oliveira. - Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1997.

92f.:il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Porto Alegre, BR-RS, 1997.  
Orientador: Laschuk, Anatólio.

1.Computação Gráfica. 2.Comando Numérico. 3.Trajectoria de Ferramentas. I. Laschuk, Anatólio. II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
Sistema de Biblioteca da UFRGS

33047

681.327.16(043)  
0485

INF  
1997/194291-7  
1997/06/27

MOD. 2.3.2

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
Reitora: Prof<sup>ª</sup>. Wrana Panizzi  
Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. José Carlos Ferraz Hennemann  
Diretor do Instituto de Informática: Prof. Roberto Tom Price  
Coordenador do CPGCC: Prof. Flávio Rech Wagner  
Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Zita Prates de Oliveira

Computação gráfica  
SISU/II

Controle automático

Tráfego: Ferramentas

ENPq 1.03.04.00-2

UFRGS INSTITUTO DE INFORMÁTICA BIBLIOTECA		
N.º CHAMADA 681.327.16 (043) 0485		N.º REG.: 33047
ORIGEM: D		DATA: 16/06/97
FUNDO: II		PREÇO: R\$ 30,00
FORN.:		II

*Dedico este trabalho à minha esposa Marta e  
a meu filho Leandro.*

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha esposa Marta pela motivação, dedicação, compreensão e paciência durante esta minha longa trajetória.

Agradeço aos meus pais Fausto e Alcy, que nunca mediram esforços para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao Prof. Anatólio Laschuk por sua orientação, amizade, disponibilidade, compreensão e por ser, para sempre, um grande exemplo de inteligência, bom senso, integridade e liderança, a ser seguido por mim.

Agradeço aos colegas Carrasco, Moraes e Caio pelo companheirismo nas horas de necessidade.

Agradeço aos colegas professores Luiz Fernando Soares Camargo e Edson Marcos Brasil, Ex-Chefes do Departamento de Fabricação e Projeto de Máquinas da UFSM, pela atenção e incentivo.

Agradeço ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e à CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento e Pesquisa, através do PICDT-UFSM, pelo incentivo financeiro recebido.

Aos familiares, aos amigos, a todos que estiveram na minha torcida, muito obrigado!

## Sumário

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>7</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> .....	<b>9</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>10</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Fundamentos</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1 Máquinas-Ferramentas</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2 Programação CNC</b> .....	<b>17</b>
2.2.1 Programação Manual .....	17
2.2.2 Programação APT .....	19
2.2.3 Sistemas Gráfico-Interativos .....	21
2.2.4 Sistemas CAD/CAM .....	22
<b>2.3 Modelagem Geométrica de Superfícies</b> .....	<b>22</b>
2.3.1 Representação por Contorno .....	23
2.3.2 <i>Octree</i> .....	24
2.3.3 Geometria Sólida Construtiva .....	25
2.3.4 Superfícies Paramétricas .....	25
<b>2.4 Sumário do Capítulo</b> .....	<b>26</b>
<b>3 Geração de Trajetórias de Ferramentas (<i>Tool Paths</i>)</b> .	<b>28</b>
<b>3.1 Sistemas de Geração de Programas CNC</b> .....	<b>28</b>
3.1.1 Superfícies 2 ½ D Limitadas por Arcos e Retas .....	29
3.1.2 Geometria Sólida Construtiva .....	31
3.1.3 <i>Octree</i> .....	32
3.1.4 Superfícies Paramétricas .....	32
<b>3.2 Tipos de <i>Tool Paths</i></b> .....	<b>35</b>
3.2.1 Ziguezague .....	35
3.2.2 Espiral .....	36
3.2.3 Isoparamétrico .....	36
3.2.4 Preenchimento ( <i>Space Filling</i> ) .....	37
<b>3.3 Otimização de Programas CNC</b> .....	<b>37</b>
<b>3.4 Reconhecimento de Forma</b> .....	<b>39</b>
<b>3.5 Sistemas de Verificação e Simulação</b> .....	<b>40</b>
<b>3.6 Sumário do Capítulo</b> .....	<b>41</b>
<b>4 Abordagem Proposta</b> .....	<b>43</b>
4.1 <i>Hardware</i> e <i>Software</i> Utilizados .....	43
4.2 Definição da Superfície - Delimitação do Trabalho .....	43
4.3 Máquina-Ferramenta e Ferramentas Consideradas .....	44
4.4 Modelador Bézier .....	47
4.4.1 Superfícies Paramétricas Bézier .....	47
4.4.2 Estrutura do Modelador .....	48

<b>4.5 Algoritmo de Geração do <i>Tool Path</i></b> .....	<b>50</b>
<b>4.5.1 Sistema de Referência</b> .....	<b>53</b>
4.5.1.1 Zero-Máquina .....	53
4.5.1.2 Zero-Peça .....	53
<b>4.5.2 Primeira Poligonalização</b> .....	<b>53</b>
4.5.2.1 Determinação das Maiores Inclinações .....	54
4.5.2.2 Determinação do Raio de Curvatura .....	54
<b>4.5.3 Seleção das Ferramentas de Corte</b> .....	<b>54</b>
4.5.3.1 Seleção da Ferramenta de Acabamento .....	55
4.5.3.2 Seleção da Ferramenta de Desbaste .....	55
<b>4.5.4 Arquivo de Dados de Ferramentas</b> .....	<b>56</b>
<b>4.5.5 Etapa de Desbaste</b> .....	<b>56</b>
4.5.5.1 Determinação dos Planos de Corte .....	57
4.5.5.2 Usinagem dos Planos de Corte .....	58
<b>4.5.6 Etapa de Acabamento</b> .....	<b>60</b>
4.5.6.1 Segunda Poligonalização .....	61
4.5.6.2 Determinação do Espaçamento entre Trajetórias .....	61
4.5.6.3 Determinação dos Pontos de Contato da Ferramenta ( <i>CCDATA</i> ) .....	63
4.5.6.4 Determinação das Posições da Ferramenta ( <i>CLDATA</i> ) .....	63
<b>4.6 Simulação e Verificação do Programa Gerado</b> .....	<b>64</b>
<b>5 Resultados</b> .....	<b>67</b>
<b>5.1 Caso 1</b> .....	<b>67</b>
5.1.1 Etapa de Desbaste .....	68
5.1.2 Etapa de Acabamento .....	70
5.1.3 Programa CNC Gerado .....	71
5.1.4 Validação .....	71
<b>5.2 Caso 2</b> .....	<b>72</b>
<b>5.3 Caso 3</b> .....	<b>75</b>
<b>6 Análise e Discussão dos Resultados</b> .....	<b>78</b>
<b>7 Conclusão</b> .....	<b>81</b>
7.1 Aplicabilidade e Custo Computacional .....	81
7.2 Objetivos Futuros .....	82
<b>Anexo A-1</b> .....	<b>83</b>
<b>Bibliografia Referenciada</b> .....	<b>84</b>
<b>Bibliografia Consultada</b> .....	<b>91</b>

## Lista de Figuras e Tabelas

FIGURA 2.1 - Fresadora com CNC [INS91] .....	16
FIGURA 2.2 - Desenho de Peça Exemplo [INS91] .....	19
FIGURA 2.3 - Definição Geométrica na Linguagem APT [GRO84] .....	21
FIGURA 2.4 - Modelo em <i>B-Rep</i> [TOZ86] .....	23
FIGURA 2.5 - Modelo em <i>Octree</i> [MOR85] .....	24
FIGURA 2.6 - Modelo em Geometria Sólida Construtiva [MOR85] .....	26
FIGURA 2.7 - Representação de uma Superfície Paramétrica .....	27
FIGURA 3.1 - Passos da Geração do <i>Tool Path</i> [PER78] .....	30
FIGURA 3.2 - <i>Tool Path</i> em Duas Direções [YEH88] .....	31
FIGURA 3.3 - <i>Tool Path</i> em Ziguezague [MAR94] .....	35
FIGURA 3.4 - <i>Tool Path</i> em Espiral [MAR94] .....	36
FIGURA 3.5 - <i>Tool Path</i> Isoparamétrico [MAR94] .....	37
FIGURA 3.6 - <i>Tool Path</i> de Preenchimento [MAR94] .....	38
FIGURA 4.1 - Superfície de Forma Livre .....	44
FIGURA 4.2 - Fresadora com CNC [INS91] .....	45
FIGURA 4.3a - Fresas de Extremidade Cilíndrica [SAN91] .....	45
FIGURA 4.3b - Fresas de Extremidade Esférica [SAN91] .....	46
FIGURA 4.4 - Usinagem com Ferramenta de Extremidade Cilíndrica [INS91] ..	46
FIGURA 4.5 - Usinagem com Ferramenta de Extremidade Esférica [SAN91] ..	47
FIGURA 4.6 - Modelador Bézier .....	48
FIGURA 4.7 - Fluxograma do Modelador Bézier .....	49
FIGURA 4.8 - Fluxograma do Algoritmo de Geração de <i>Tool Path</i> .....	50
FIGURA 4.9 - Fluxograma do Desbaste .....	51
FIGURA 4.10 - Fluxograma do Acabamento .....	52
FIGURA 4.11 - Condições para Seleção da Ferramenta de Desbaste .....	56
FIGURA 4.12 - Profundidade Máxima Recomendada p/ Ferr. de Desbaste ...	57
FIGURA 4.13 - Plano de Corte de uma Cavidade .....	58
FIGURA 4.14 - Plano de Corte de uma Protrusão .....	58
FIGURA 4.15 - Dois Trechos de Movimento da Ferr. Separados por Protrusão	59
FIGURA 4.16 - Determinação de Contorno Equidistante .....	60
FIGURA 4.17 - Rugosidade [MAR94] .....	61
FIGURA 4.18 - Cálculo do Espaçamento entre Traj. da Ferr. no Acabamento ..	62
FIGURA 4.19 - Rugosidade com Inclinação [MAR94] .....	62
FIGURA 4.20 - Cálculo do Espaçamento em Traj. de Superfícies Inclinadas ...	63
FIGURA 4.21 - Determinação de Posição da Ferramenta [FAU79] .....	64
FIGURA 4.22 - Envelopes .....	65
FIGURA 4.23 - Envelope Gerado pela Ferramenta de Extremidade Esférica ...	66
FIGURA 5.1 - Caso 1 .....	67
FIGURA 5.2 - Planos de Corte .....	69
FIGURA 5.3 - <i>Tool Path</i> em cada Plano de Corte .....	70
FIGURA 5.4 - <i>Tool Path</i> em Plano de Cavidade .....	70
FIGURA 5.5 - <i>Tool Path</i> de Acabamento .....	72
FIGURA 5.6 - Comparação da Superfície Paramétrica e a Superfície Simulada	72
FIGURA 5.7 - Caso 2 .....	73

FIGURA 5.8 - <i>Tool Path</i> de Acabamento . . . . .	74
FIGURA 5.9 - Comparação da Superfície Paramétrica e a Superfície Simulada	75
FIGURA 5.10 - Caso 3 . . . . .	75
FIGURA 5.11 - <i>Tool Path</i> de Acabamento . . . . .	77
FIGURA 5.12 - Comparação da Superfície Paramétrica e a Superfície Simulada	77
TABELA 5.1 - Pontos de Controle . . . . .	68
TABELA 5.2 - Coordenada y dos Planos de Corte . . . . .	69
TABELA 5.3 - Dados do Espaçamento entre as Trajetórias . . . . .	71
TABELA 5.4 - Coordenada y dos Planos de Corte . . . . .	73
TABELA 5.5 - Dados do Espaçamento entre as Trajetórias . . . . .	74
TABELA 5.6 - Coordenada y dos Planos de Corte . . . . .	76
TABELA 5.7 - Dados do Espaçamento entre as Trajetórias . . . . .	76



## Lista de Abreviaturas

APT - *Automatically Programmed Tools*

CAD - *Computer Aided Design*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CASCAM - *Constraint-based Automatic System for Sculptured Surface*

### *Cavity Machining*

CCDATA - *Cutter Contact Data*

CISPA - *Computer Interactive Surfaces Pre-APT*

CLDATA - *Cutter Location Data*

CNC - *Comando Numérico Computadorizado*

CN ou NC- *Comando Numérico*

GSD ou DSG- *Geometria Sólida Destrutiva*

GSG ou CSG - *Geometria Sólida Construtiva*

NURBS - *Non Uniform Rational B-Splines*

## Resumo

A fabricação de peças mecânicas por usinagem tornou-se mais versátil com o uso de máquinas-ferramentas com Comando Numérico Computadorizado. Este recurso permitiu a obtenção de superfícies de geometria mais complexa, extremamente difíceis de se fabricar com máquinas convencionais. A tarefa de escrever os programas CNC para usinar tal geometria também não é fácil, sendo necessário recursos auxiliares para alcançar este objetivo. O embasamento para utilização desta tecnologia passa inicialmente pelos conceitos e fundamentos de máquinas-ferramentas com CNC, programação CNC e modelagem geométrica de superfícies. Na elaboração deste estudo foram analisados vários relatos sobre sistemas de geração de programas CNC, tipos de trajetórias de ferramentas, otimização de programas CNC, reconhecimento de forma e sistemas de simulação e verificação. Desta análise foi estruturada uma estratégia para realização deste trabalho, que trata da implementação de um sistema de geração de programas CNC para máquinas de 3 eixos, destinado a superfícies de forma livre. O *software* admite modelos de superfícies criadas em um modelador na forma paramétrica Bézier e gera segmentos de programa CNC para usiná-las em duas etapas: desbaste e acabamento. Do modelo paramétrico são geradas duas poligonalizações para estas duas etapas. A primeira, de menor resolução, é usada para a operação de desbaste, para seleção de ferramentas e para determinação das inclinações da superfície, dados necessários para a operação posterior. A segunda, de maior resolução, oferece melhores condições de aproximação da superfície paramétrica e permite a geração da trajetória usada no acabamento. A etapa de desbaste, destinada à remoção do excesso de material da peça, é realizada com uma ferramenta de extremidade cilíndrica trabalhando em vários planos de corte. Cada plano é usinado através de movimentos em ziguezague, e posteriormente faz-se uma trajetória equidistante ao contorno das cavidades ou protruções existentes. Já a etapa de acabamento, que visa conferir a forma e dimensão desejadas à peça, é realizada com uma ferramenta de extremidade esférica trabalhando em ziguezague por toda a superfície. Nesta etapa, são determinados espaçamentos diferenciados entre os movimentos da ferramenta, segundo as inclinações da superfície. Desta forma, consegue-se uma redução no número de comandos, sem perder em qualidade. Três casos são apresentados, sendo o primeiro, uma superfície formada por uma cavidade e uma protrusão, o segundo, uma cavidade e o terceiro uma protrusão. O primeiro caso apresenta todos os passos executados nestas etapas consideradas. Os demais apresentam os resultados obtidos. Para verificar o programa CNC gerado foi implementado um simulador que confere o resultado obtido com a superfície modelada na forma paramétrica. Este simulador também tem um funcionamento diferenciado para cada etapa de usinagem e confere uma boa precisão à peça acabada. Os resultados demonstram a eficiência do sistema quanto à sua rapidez e também quanto à forma da peça. Em função das resoluções consideradas nos sistemas de geração e de simulação, encontrou-se um erro entre a superfície paramétrica e a superfície simulada. Conclui-se que a utilização de maior resolução para a geração da trajetória da ferramenta na etapa de acabamento é decisiva para a redução do erro encontrado comparando o modelo paramétrico com a superfície simulada.

PALAVRAS-CHAVES: Trajetórias de Ferramentas, Programação CNC, Comando Numérico Computadorizado.

## **TITLE: "A System of Tool-Path Generation in 3 Axis"**

### **Abstract**

Manufacturing of mechanical pieces by machining became more versatile with the use of tool machines equipped with Computerized Numerical Control. This resource allows more complex geometry surfaces, which are very difficult of manufacture with conventional machines. Writing of CNC programs for machining such geometry is also not easy, demanding further resources to fulfill this goal. Basics of using this technology includes concepts and fundamentals of CNC tool machines, CNC programming and geometrical modeling of surfaces. In this dissertation, it were analysed several reports of CNC tool path generation systems, tool path types, CNC program optimization, form recognition and simulation and verification systems. From this analysis, it was designed a strategy to prepare this dissertation, whose main purpose was to implement a CNC program generation system for 3 axis machines for free-form surfaces. The software admits surface models designed in a modeler using Bézier parametric form and generates segments of CNC programs for machining in two stages: rough and finishing. From the parametric model, two poligonalizations are generated for these stages. The first, of lower resolution, is used for a rough operation, for tools selection and for determination of surface inclinations, which are necessary data for later operations. The second poligonalization, of greater resolution, offers better conditions of approximation to the parametric surface and allows the generation of the tool path used in finishing. The rough stage, used to remove excess of material in this piece, is realized with a cylindrical end cutter working in several cutting planes. Every plane is machined in zigzag movements and later is done a tool path with constant offset with the existent cavity or protrusions. The finishing stage, whose goal is to give the desirable form and dimension to the piece, is done with a ball-end cutter, working in zigzag upon the whole surface. In this stage, no equal distances are determined between the tool movements according to surface inclinations. Thus, a reduction in the number of commands is obtained without loss of quality. Three cases are presented, where the first one is a surface formed by a cavity and a protrusion, the second one is a cavity, and the third one is a protrusion. The first case is completely presented with all the steps. In the others cases, results are given. In order to evaluate the generated CNC program, it was implemented a simulator that checks the results with the modeled surface. This simulator uses different approaches in each stage of machining and gives a good precision to piece finishing. The results demonstrate the system efficiency as to speed, performance and also to form. On account of resolutions considered in the generation system and in simulation, errors were found between the parametric and the simulated surfaces. Comparing the parametric model with the simulated surface, it is clear that the use of greater resolution during the generation of the tool path in the finishing stage is decisive to reduce the errors.

**KEYWORDS:** Tool Path, CNC Programming, Computer Numerical Controlled

## 1 Introdução

O uso de máquinas-ferramentas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) tem sido muito difundido na indústria atual devido aos grandes avanços que esta tecnologia proporcionou, permitindo uma maior flexibilidade, qualidade e precisão na fabricação de peças por remoção de material. Estes benefícios garantem ainda redução de custos de produção, de prazos de entrega e do lote mínimo de produção.

Por outro lado, uma vantagem importante oferecida pelo uso do Comando Numérico Computadorizado foi a possibilidade de obtenção de geometrias mais complexas através de usinagem. Desta forma, tornou-se possível a fabricação de peças mais leves com a qualidade exigida na indústria aeronáutica e automobilística. Em muitos casos, a ampliação de geometrias possíveis de serem produzidas possibilitou a redução de peso e volume das peças, o que se traduz em economia de material e consequentemente redução de custos.

Outra grande vantagem é a possibilidade de produção de peças de geometria complexa, com grande precisão, de forma repetitiva. Anteriormente, através dos processos convencionais, se conseguia fabricar determinadas peças graças a habilidade e paciência de alguns operadores de máquinas-ferramentas. Certamente este esforço, que permitia a criação de verdadeiras peças artesanais, não seria possível de ser repetido de modo a conferir exatidão em várias situações consecutivas.

As aplicações de CNC são bastante difundidas em máquinas-ferramentas destinadas às operações de usinagem convencional, mas também estão sendo utilizadas em máquinas de eletroerosão, puncionadeiras [MAC87], dobradeiras de tubos para produção de escapamentos, máquinas para produção de molas e até na produção de próteses dentárias [MOR90].

Todas as situações citadas acima têm no mínimo uma das seguintes características: forma complexa, necessidade de posicionamento preciso e trabalho repetitivo. Por isso, muito tem sido pesquisado para desenvolver esta tecnologia. Recursos de Projeto Auxiliado pelo Computador (CAD - *Computer-Aided Design*) e Manufatura Auxiliada pelo Computador (CAM - *Computer-Aided Manufacturing*) estão sendo implementados em vários tipos de processos de fabricação, sobretudo em usinagem.

A necessidade de usinar superfícies complexas tem desencadeado alguns estudos para a redução dos erros de programação. Segundo Voelcker, *apud* Mortenson [MOR85], dois caminhos foram claramente definidos: o desenvolvimento de sistemas de simulação e verificação dos programas CNC e a implementação de algoritmos para a geração automática de programas CNC através da interpretação geométrica.

Neste trabalho, essas duas direções foram seguidas. O objetivo principal foi o desenvolvimento de um sistema de geração automática de trajetórias de ferramentas para máquinas de 3 eixos. Para testar a eficiência do método adotado foi implementado um simulador de programas CNC.

Tais recursos contribuem grandemente, não só para a qualidade dos produtos obtidos através desta tecnologia, como também para dar maior agilidade à tarefa de fabricação de peças em máquinas CNC.

Para a implementação deste sistema foi considerado um determinado domínio de peças tendo em vista as grandes variações de forma possíveis.

Utilizando as superfícies de forma livre, modeladas parametricamente através da forma Bézier, observaram-se as particularidades da programação de máquinas CNC para usinar este tipo de superfície.

A segmentação do programa em etapas de desbaste e acabamento foi a estratégia adotada. O desbaste é realizado em planos de corte com uma ferramenta de extremidade cilíndrica, sendo que as cavidades e protruções são usinadas em trajetórias em ziguezague. O acabamento, realizado com uma ferramenta de extremidade esférica, é realizado em ziguezague por toda a superfície.

Para verificação do programa CNC gerado foi implementado um *software* que simula a sua execução e compara o resultado com a superfície desejada. Nesta análise podem-se observar resultados satisfatórios pois o erro encontrado foi desprezível.

Os assuntos discutidos neste texto são apresentados nos próximos capítulos, conforme informações a seguir:

No capítulo 2, são apresentados alguns fundamentos sobre o assunto deste trabalho, como máquinas-ferramentas, programação CNC e modelagem geométrica de superfícies.

No capítulo 3, são definidos e relatados os sistemas de geração, verificação e simulação de programas CNC.

No capítulo 4, é apresentada a abordagem proposta neste trabalho para a geração de trajetórias de ferramentas. A estrutura adotada e os algoritmos criados são mostrados neste capítulo.

No capítulo 5, são mostrados os resultados obtidos com esta abordagem. Também é apresentada a validação do sistema com a simulação e verificação do programa gerado.

No capítulo 6, os resultados são discutidos e comparados com os objetivos e com outros trabalhos relatados.

As conclusões e seus desdobramentos são apresentados no capítulo 7.

## 2 Fundamentos

Para uma melhor compreensão deste trabalho, alguns assuntos, relacionados com máquinas-ferramentas, programação CNC e modelagem de superfícies, são descritos neste capítulo, apresentados através de conceitos, fundamentos, ou através de relatos de pesquisadores da área.

### 2.1 Máquinas-Ferramentas

O homem criou as máquinas e as ferramentas para facilitar seu trabalho no que diz respeito ao esforço físico, velocidade e repetibilidade. Através dos tempos, muitas máquinas foram inventadas para facilitar as diversas atividades de trabalho que existem, desde aquelas onde o uso de alavancas permitia aumentar a capacidade de movimentação de carga, passando pelas diversas aplicações usando a energia dos rios e do vento, usando a força animal, e até aquelas que permitiam a produção de energia através de um meio combustível. Aos poucos, a energia antes produzida de forma natural ou com ação animal, foi substituída pela energia mecânica produzida pelas máquinas a vapor e posteriormente pelos motores de combustão.

Com o passar do tempo, foi possível utilizar a energia elétrica, que permitiu um grande avanço para a redução do tamanho de determinadas máquinas. Durante o período de obtenção de conhecimento tecnológico para controlar esta forma de energia, muito foi desenvolvido em elementos de transmissão e acionamentos.

Com esse desenvolvimento foi possível pensar em meios de tornar a fabricação de determinados produtos mais ágil, ou seja, com um melhor aproveitamento das máquinas para com isso reduzir o tempo de fabricação. Foram desenvolvidos melhores materiais para ferramentas e diversos tipos de mecanismos para permitir o que se chamou de ciclo de fabricação. O ciclo de fabricação é o conjunto de etapas realizadas para a fabricação de um determinado produto.

Tratando-se de fabricação de peças mecânicas, este ciclo de fabricação pode ser realizado de diversas formas. Autores como Ferraresi [FER77] consideram dois tipos básicos: a fabricação com remoção de material e a fabricação sem remoção de material. O primeiro tipo trata dos processos de usinagem, realizado em vários tipos de máquinas de geometrias específicas para as suas aplicações. O segundo, também com diversos tipos de máquinas para cada aplicação, trata dos processos de conformação mecânica.

Neste trabalho, considerou-se a fabricação por usinagem, onde a remoção do material de uma peça para alterar sua geometria, é realizada por vários tipos de máquinas em uma determinada seqüência de operações. Esta seqüência de usinagem é chamada de processo de fabricação.

Para realizar as etapas de um processo de fabricação foram desenvolvidas as máquinas-ferramentas, ou máquinas operatrizes, que, em função de suas diversas formas e dimensões, tomaram possível a fabricação de uma infinidade de tipos de peças e, conseqüentemente, de outras máquinas. E, portanto, foram modernizadas e adequadas às necessidades e aos recursos disponíveis para proporcionar maior produção, segurança e qualidade. Mesmo assim, muitas limitações persistiram, principalmente tratando-se de

geometrias complexas.

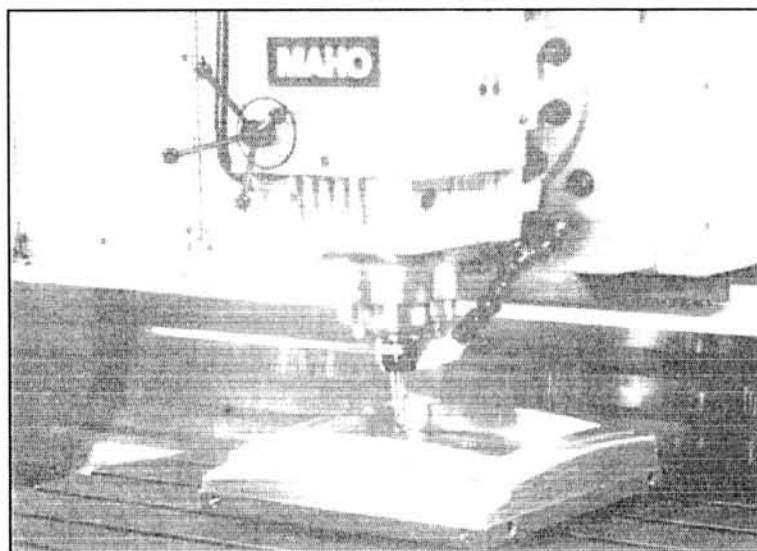
A vinculação da forma da peça a um determinado tipo de máquina-ferramenta, se deve, fundamentalmente, ao fato de que a variação dos movimentos das máquinas é difícil de ser controlada. Logo, foram utilizados dispositivos copiadores, que permitiam a reprodução de uma determinada trajetória por uma ferramenta. Este método foi, sem dúvida, um grande avanço, porém necessitava a confecção de diversos modelos para a utilização.

Mas para trabalhar geometrias complexas sem o uso de modelos convencionais, foi criado o Comando Numérico (CN). Desde o desenvolvimento da primeira máquina-ferramenta com Comando Numérico no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) em 1952 [MAC87], e posteriormente com o advento dos microprocessadores e o desenvolvimento do Comando Numérico Computadorizado (CNC), as máquinas-ferramentas ficaram mais precisas, versáteis e robustas.

Existem máquinas que determinam o perfil da peça através de movimentos regradados ou através da geometria da própria ferramenta. Outras, necessitam de um controle de posicionamento para, em função disso, usar o perfil desejado. Neste segundo caso, estão as máquinas-ferramentas que utilizam Comando Numérico Computadorizado, como os tornos, as fresadoras, centros de torneamento, centros de usinagens, furadeiras, entre outras. Este recurso possibilita rapidez e precisão de posicionamento, além de outras vantagens como troca automática de ferramentas, variação de velocidades e um controle de todas as etapas da usinagem de uma peça.

A utilização do Comando Numérico Computadorizado proporcionou também um menor número de peças e de dispositivos de usinagem a serem trocados para cada operação diferente, reduzindo consideravelmente o tempo de preparação das máquinas.

A figura 2.1 mostra uma máquina-ferramenta com Comando Numérico Computadorizado. A máquina é uma fresadora, onde a ferramenta, chamada fresa, atua de forma rotativa e remove um volume de material através de sua movimentação, produzindo a forma desejada.



**Figura 2.1** - Fresadora com CNC [INS91]



## 2.2 Programação CNC

O Comando Numérico Computadorizado é um equipamento eletrônico capaz de receber informações através de uma entrada própria e enviar à máquina-ferramenta de modo que esta execute as operações programadas sem intervenção do operador [MAC87].

A programação CNC, do ponto de vista restrito, significa a preparação de um elemento de entrada de dados (fita perfurada, magnética, etc.) no sistema comando-máquina, para que ele, movimentando a ferramenta, produza a peça para qual foi programado. Do ponto de vista mais amplo, a programação CNC começa quando as características da peça são analisadas para determinar o tipo de equipamento necessário. Logo após vem a decisão a respeito da fixação, tipo, forma e seqüência de ferramentas, suas trajetórias, bem como as condições de usinagem a serem usadas [FER84].

A elaboração de um programa CNC é uma tarefa bastante minuciosa pois envolve uma série de dados relacionados com a geometria da peça a ser produzida, com tipo de máquina a ser utilizada, com as ferramentas disponíveis e ainda todos os fundamentos de usinagem para a obtenção de um produto final com todas as características desejadas. Sendo assim, é uma atividade extremamente importante, que deve ser executada por pessoal experiente e capacitado nesta área.

Queiroz e Stemmer [QUE86] apresentaram os seguintes métodos de programação CNC:

- a) Programação manual;
- b) Programação do tipo APT;
- c) Sistemas gráfico-interativos;
- d) Sistemas CAD/CAM.

Nos dois primeiros tipos, o programador elabora o programa, que geralmente é verificado através de sistemas de simulação e/ou é testado diretamente na máquina. Já nos dois últimos a elaboração do programa é realizada com auxílio do computador em situações com geometria totalmente definida onde todos os dados necessários são informados, mas a geração final do programa é feita pelo sistema de programação assistida pelo computador.

A seguir, serão apresentadas algumas informações sobre os tipos citados acima.

### 2.2.1 Programação Manual

A programação manual consiste da elaboração de um programa na linguagem que o Comando Numérico Computadorizado trabalha e portanto entende. Trata-se de um conjunto de códigos formados por letras e algarismos, sendo apresentados com alguns parâmetros necessários a cada comando.

Existem diversos comandos normalizados, conforme a norma DIN 66025 *apud* IFAO [INS91], para posicionamento da ferramenta, ligar e desligar a rotação da ferramenta, ativar e desativar o uso de fluido de corte, ativar e desativar correção de diâmetro da ferramenta, ciclos pré-programados como o de furação, rosqueamento e alguns outros.

Deste modo, o programador escreve o programa com estes comandos usando os parâmetros necessários e, para o posicionamento, utiliza um sistema de coordenadas que pode ser absoluto ou incremental (relativo à posição anterior).

Por exemplo, o comando para um deslocamento da ferramenta em trajetória linear para executar uma usinagem é o seguinte:

*N01 G01 X20000 Y40000 Z0000 F50,*

onde *N01* indica o número da linha,  
*G01* identifica o comando chamado de interpolação linear,  
*X20000*, *Y40000* e *Z0000* indicam a posição final após o comando,  
e *F50* indica a velocidade de avanço para esta operação.

Já para execução de uma trajetória circular utiliza-se o comando G02 ou G03, de acordo com o sentido desejado, se horário ou anti-horário, seguido dos mesmos parâmetros do comando G01, acrescidos de parâmetros referentes à posição do centro do arco de circunferência em que a ferramenta se movimentará, dado necessário para o caso de arcos menores que 90 graus.

Entretanto, muitas etapas podem ser facilitadas com a utilização de alguns recursos auxiliares. Quanto aos fundamentos de usinagem, podem ser usadas tabelas com parâmetros de velocidades e avanços para cada combinação de ferramenta e peça, ou então os modernos bancos de dados de usinagem. Tratando-se da geometria das peças podem ser usados modeladores geométricos e sistemas de geração de programas, que serão tratados posteriormente.

A figura 2.2 mostra o desenho de uma peça e abaixo é descrito o programa para usiná-la, usando para tal uma fresadora MAHO MH500 W, segundo IFAO [INS91].

PROGRAMA: PECA1.CNC

N01 G55	Posição do ponto zero
N02 G18 S1250 T1 M66	Plano de trabalho, chamado de ferramenta
N03 G0 X-12 Y-5 Z-12 F500 M3	Ponto part. fres. quadrado
N04 G43	Correção do raio "até"
N05 G1 Z12	Avanço em reta
N06 G41 X138	Correção do raio esq.
N07 G1 Z138	Fresagem do quadrado
N08 G1 X12	Fresagem do quadrado
N09 G1 Z-12	Fresagem do quadrado
N10 G40	Fim da correção do raio
N11 G0 Y5	Saída até a distância de segurança
N12 G87 X80 Y80 Z-8 B5 R15 175 K4	Ciclo de fresamento de cavidades
N13 G79 X75 Z75 F400 M3	Chamada do ciclo e posicionamento
N14 G79 Y125 M30	Retorno ao início do programa

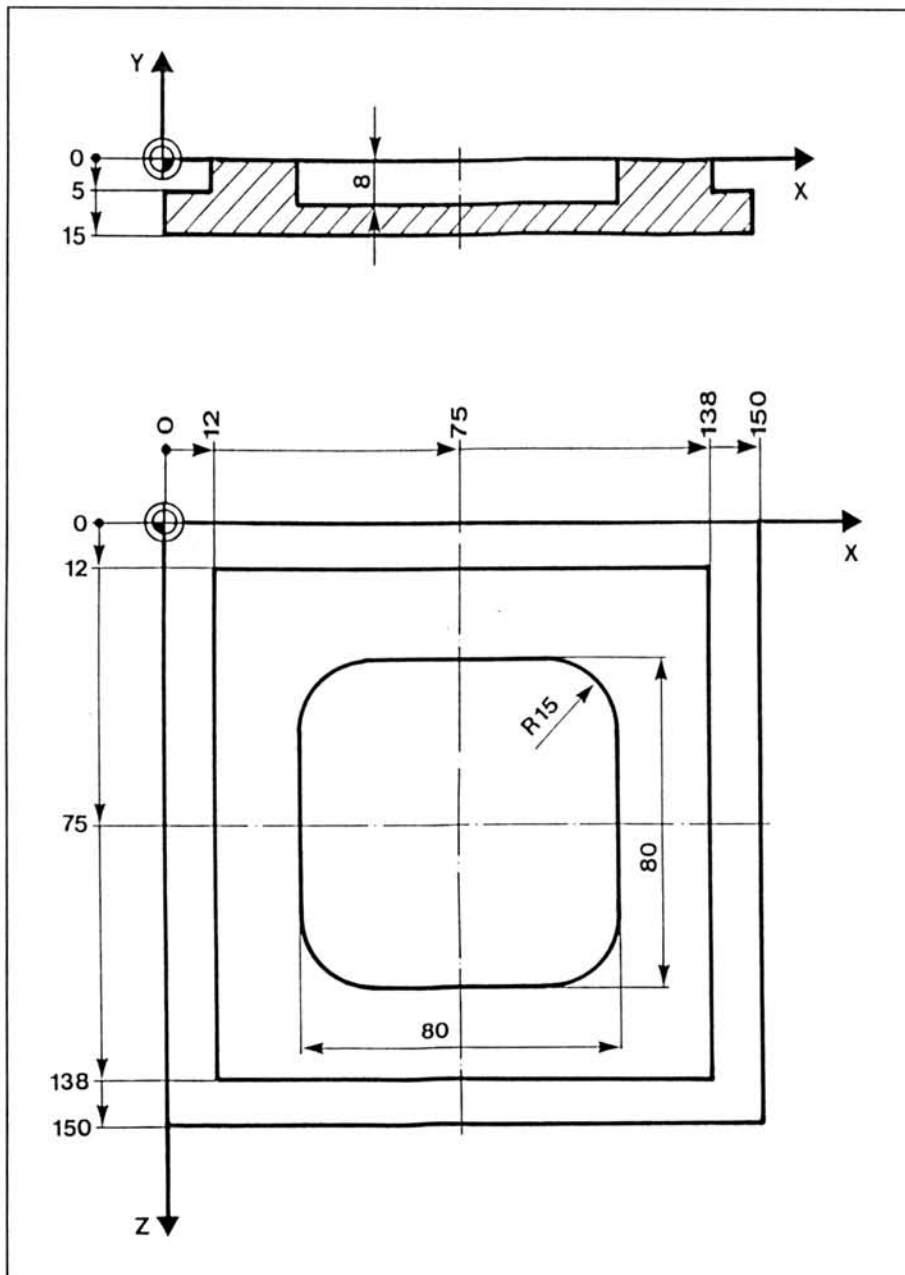


Figura 2.2 - Desenho de uma Peça Exemplo[INS91].

### 2.2.2 Programação APT

Em função da extensão dos programas elaborados através da programação manual para peças de geometria mais complexa e a dificuldade de sua verificação, foram desenvolvidas linguagens de programação de alto nível para facilitar o trabalho de programação.

Destas linguagens, a mais difundida foi a APT (*Automatically Programmed Tools*), que passou a ser amplamente adotada, sendo criadas muitas outras linguagens a partir desta.

Segundo Groover e Zimmers [GRO84], o programa APT apresenta quatro tipos de declarações:

- a) **declarações de geometria:** onde são definidos todos os elementos geométricos usados;
- b) **declarações de movimentos:** onde são descritos os movimentos da ferramenta de corte;
- c) **declarações do pós-processador:** onde são especificados a máquina-ferramenta e o comando numérico usado, para adequar avanços e velocidades empregados;
- d) **declarações auxiliares:** onde são identificadas ferramentas, tolerâncias, etc.

Nesta linguagem, o programador define as entidades geométricas no próprio desenho da peça e descreve, na seção de declarações de geometria, todos os dados necessários para identificá-las. A figura 2.3 exemplifica a seguinte definição de geometria:

```
P0 = POINT/0, -1.0, 0
P1 = POINT/6.0, 1.125, 0
P2 = POINT/0, 0, 0
P3 = POINT/6.0, 0, 0
P4 = POINT/1.75, 4.5, 0
L1 = LINE/P2, P3
C1 = CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 1.125
L2 = LINE/P4, LEFT, TANTO, C1
L3 = LINE/P2, P4
PL1 = PLANE/P2, P3, P4.
```

A seguir, são introduzidos comandos de movimentação da ferramenta, que nesta linguagem são muito fáceis pois são palavras em inglês, do cotidiano industrial. Estes comandos são relacionados com as entidades já definidas e rotuladas, logo a linguagem é mais simples de ser analisada. Por exemplo: GOTO/P1 comanda a ferramenta para posição do ponto P1.

As declarações do pós-processador também seguem o mesmo padrão. Por exemplo: FEDRAT/6.0 indica a razão de avanço em polegadas por minuto.

Como exemplo de declaração auxiliar, tem-se CUTTER/.500, que informa que o diâmetro da ferramenta é de 0,5 polegadas, para que o centro desta, em operações de contornos, fique a 0,25 polegadas equidistantes do limite da peça.

O programa escrito nesta linguagem é, então, traduzido por um compilador APT, para o *CLDATA* (*Cutter Location Data*) que é uma lista das posições da ferramenta.

Posteriormente deve ser utilizado um programa pós-processador para cada tipo de máquina-ferramenta (cada fabricante tem alguns comandos um pouco diferentes), para traduzir o *CLDATA* para a linguagem de programação manual que deverá ser enviada à máquina. Maiores esclarecimentos sobre o assunto podem ser encontrados no artigo de Bedi e Vickers [BED87], que desenvolveram um pós-processador básico para interface entre os comandos de descrição da trajetória da ferramenta em APT e os códigos G requeridos pela máquina CNC em questão.

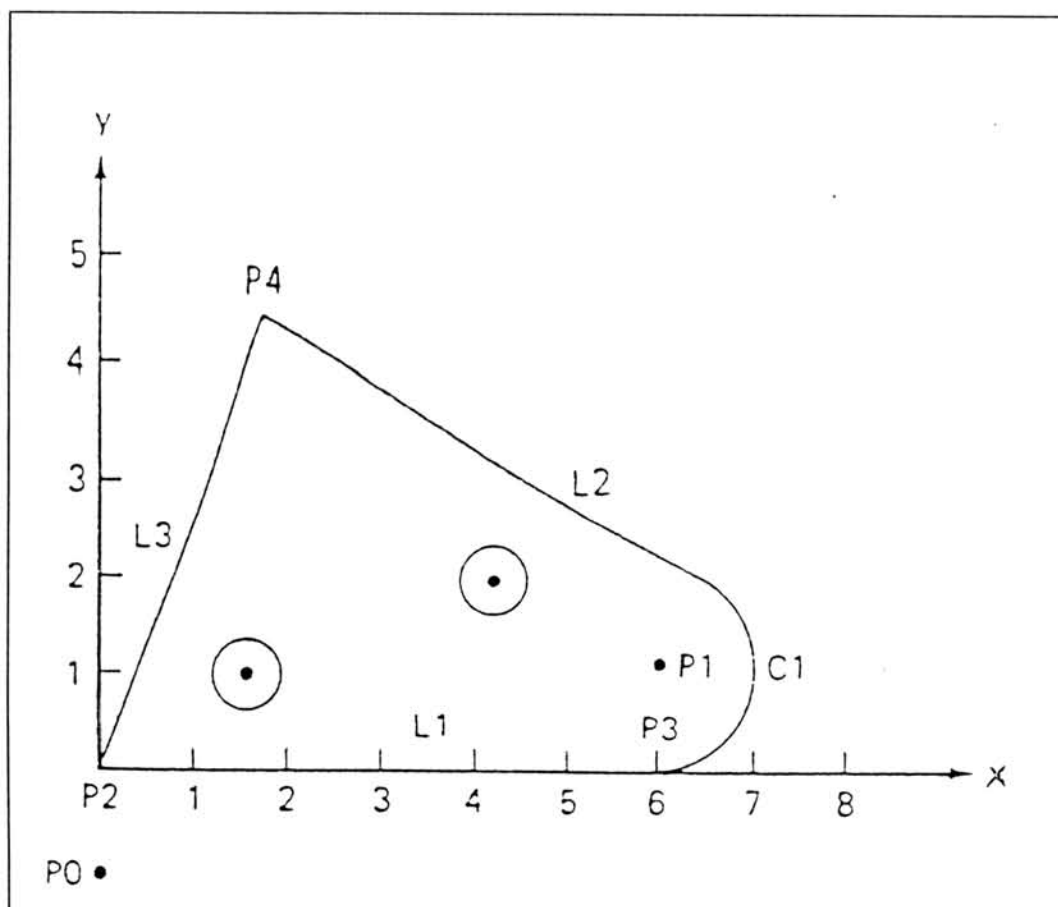


Figura 2.3 - Definição Geométrica na Linguagem APT [GRO84]

### 2.2.3 Sistemas Gráfico-Interativos

Os Sistemas Gráfico-Interativos são sistemas computacionais destinados à programação CNC que utilizam a interatividade homem-máquina para determinar as condições desejadas na elaboração de um programa.

Diante da grande diversificação de sistemas existentes, pode-se classificar os sistemas gráficos interativos quanto à entrada de dados em: com linguagem e sem linguagem. O primeiro tipo utiliza linguagens simbólicas, com declarações que expressam a escolha da ferramenta, definição de geometria por elementos do contorno, determinação dos movimentos da ferramenta e informações complementares de representação gráfica e armazenamento. O segundo tipo usa recursos como ícones, *softkey*, mouse, *light pen*, etc., que permitem a entrada de dados de forma bastante fácil.

Outra classificação se refere à estrutura de dados, podendo serem classificados em sistemas de estrutura tipo APT, que apresentam a estrutura clássica APT, usando definições de ponto, linha, círculo, plano, etc. e finalmente as definições de movimento de ferramenta, e sistemas de estrutura tipo CAD, onde há uma estruturação bastante simples de definição topológica e definição geométrica. Neste último tipo o elemento básico é o ponto, as linhas são segmentos em vez de linhas infinitas como no APT e os círculos são arcos com ponto inicial e final.

### 2.2.4 Sistemas CAD/CAM

Os Sistemas CAD (*Computer Aided Design*) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*) são os meios mais modernos para a elaboração de programas CNC. Tais sistemas permitem uma interpretação da geometria das peças armazenadas em arquivo gráfico criado no CAD e a geração dos programas CNC de acordo com algumas informações fornecidas pelo programador-usuário através do módulo CAM.

Segundo Volpato e Ahrens [VOL95], em termos gerais, os sistemas CAD/CAM disponíveis no mercado exigem os seguintes passos para a obtenção de programas CNC:

- Preparação das superfícies a serem usinadas;
- Seleção dos parâmetros e variáveis do processo (tolerâncias, sobremetal, ferramentas, parâmetros de corte, etc.);
- Geração automática das trajetórias das ferramentas;
- Pós-processamento dos programas, adequando ao formato dos comandos e características das máquinas.

A necessidade do desenvolvimento destas ferramentas de programação se deve à complexidade das formas criadas e à dificuldade de elaboração de programas CNC para estas geometrias. As aplicações da indústria aeronáutica, com uso de peças de alumínio e de forma intensa na produção de matrizes para injeção de peças plásticas, são exemplos de geometrias bastante complexas onde este recurso se tornou indispensável.

As vantagens do uso de Sistemas CAD/CAM conduziram a aplicações também no projeto e fabricação de ferramentas de corte. Um estudo de Bidanda e Billo [BID96] demonstrou os benefícios desta implementação. Em uma ferramenta citada conseguiu-se reduzir o tempo tanto de projeto como de fabricação em 50%.

Buscando a automação da manufatura, muitas outras etapas da fabricação estão sendo auxiliadas pelo computador, e anexadas aos Sistemas CAD/CAM. O Planejamento do Processo de Fabricação Auxiliado pelo Computador, do inglês, *Computer Aided Process Planning - CAPP* é um exemplo bastante claro desta tendência. Muitos sistemas já consideram algumas características, *features* em inglês, como rasgos, cavidades, entalhes, furos, etc. Desta forma os Sistemas CAD/CAM podem estar integrados a vários outros sistemas que visam automatizar as etapas de projeto e fabricação.

## 2.3 Modelagem Geométrica de Superfícies

Toda peça a ser produzida para uma aplicação deve ser projetada e desenhada. Entre outros aspectos, o projeto trata de seu dimensionamento, seleção de materiais, sua forma, e o desenho é a forma de visualizar e guardar estas informações.

Inicialmente, tais desenhos eram elaborados por desenhistas e armazenados em cópias de papel. Hoje os desenhos são criados em sistemas CAD que permitem a criação de modelos geométricos ou simplesmente desenhos das vistas planas.

A criação dos modelos geométricos torna possível a manipulação das peças, selecionando situações para visualização, que podem ser as vistas orientativas

para o fabricante da peça, cortes para facilitar a compreensão de um detalhe, ou simplesmente a escolha de uma posição onde mostre uma superfície desejada.

Para isso, existem vários métodos de modelagem das superfícies e abaixo serão discutidas algumas considerações sobre os métodos mais usuais. De acordo com Foley *et al.* [FOL90], Mortenson [MOR85] e Tozzi [TOZ86]:

### 2.3.1 Representação por Contornos

A representação de uma peça por seu contorno é obtida pela descrição de todas suas faces. Cada face é delimitada por arestas e cada uma destas, é formada por dois vértices. Esta abordagem poliédrica é bastante prática pois as faces poligonais são facilmente manipuláveis. A figura 2.4 ilustra este tipo de modelagem.

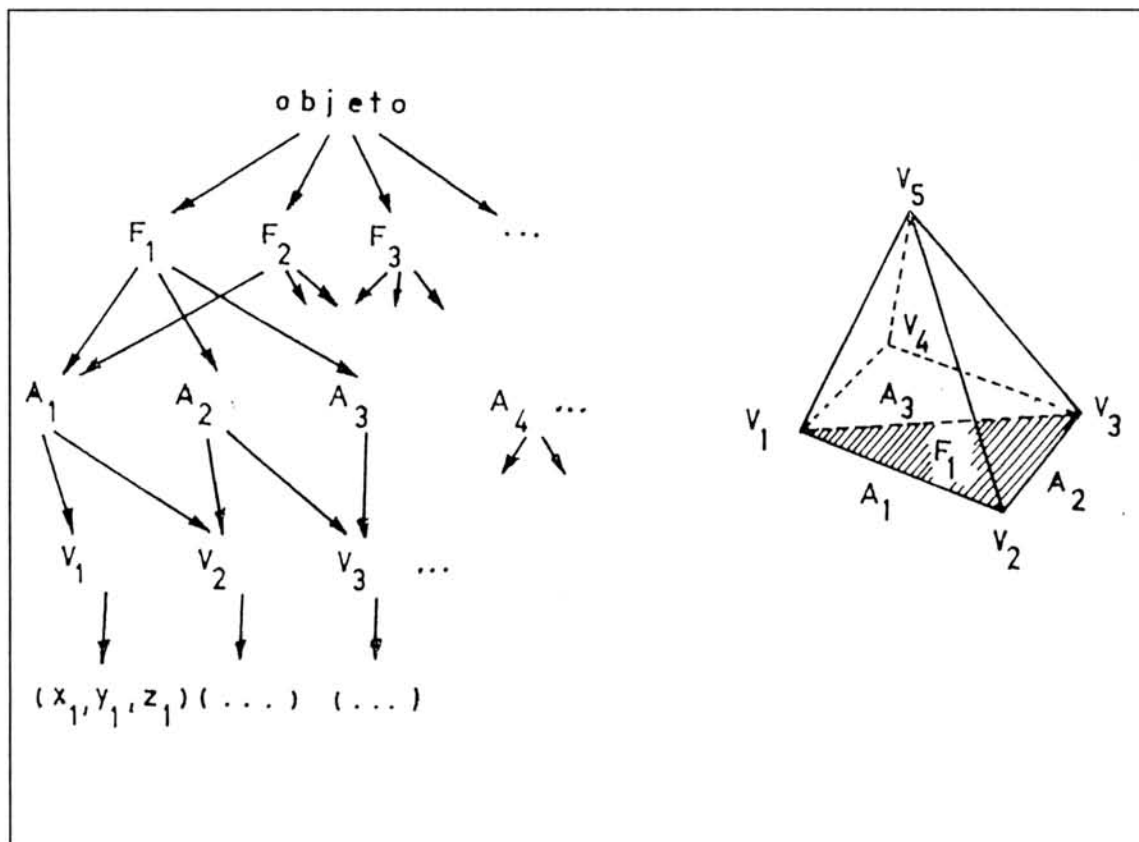


Figura 2.4 - Modelo em B-Rep [TOZ86]

Deste modo, pode-se manipular estas estruturas, variando o número de faces de um objeto, alterando as coordenadas de algum vértice, etc. Muitas operações são facilitadas por esta forma de representação. Como todos dados são organizados em faces, arestas e vértices, torna-se um meio prático para representar objetos, sendo um fator limitante o consumo de memória para superfícies com grande complexidade, e conseqüentemente, grande número de faces.

Uma vantagem deste tipo de representação é a possibilidade do uso de um equacionamento matemático menos complexo, visto que trata com primitivas geométricas e a maiorias das operações são resolvidas com o uso de geometria plana. Sendo assim, muitos algoritmos são implementados com certa rapidez.

### 2.3.2 Octree

*Octree* é um tipo de modelagem baseada na enumeração espacial e decomposição celular, ou seja, é uma malha tridimensional formada por cubos. O armazenamento desta malha implica grande quantidade de memória que em alguns sistemas é otimizada pelo uso de uma grade variável com maior densidade no contorno do objeto. A figura 2.5 apresenta a descrição de um objeto por *octree*, sendo que os cubos podem apresentar-se cheios, vazios ou parcialmente cheios.

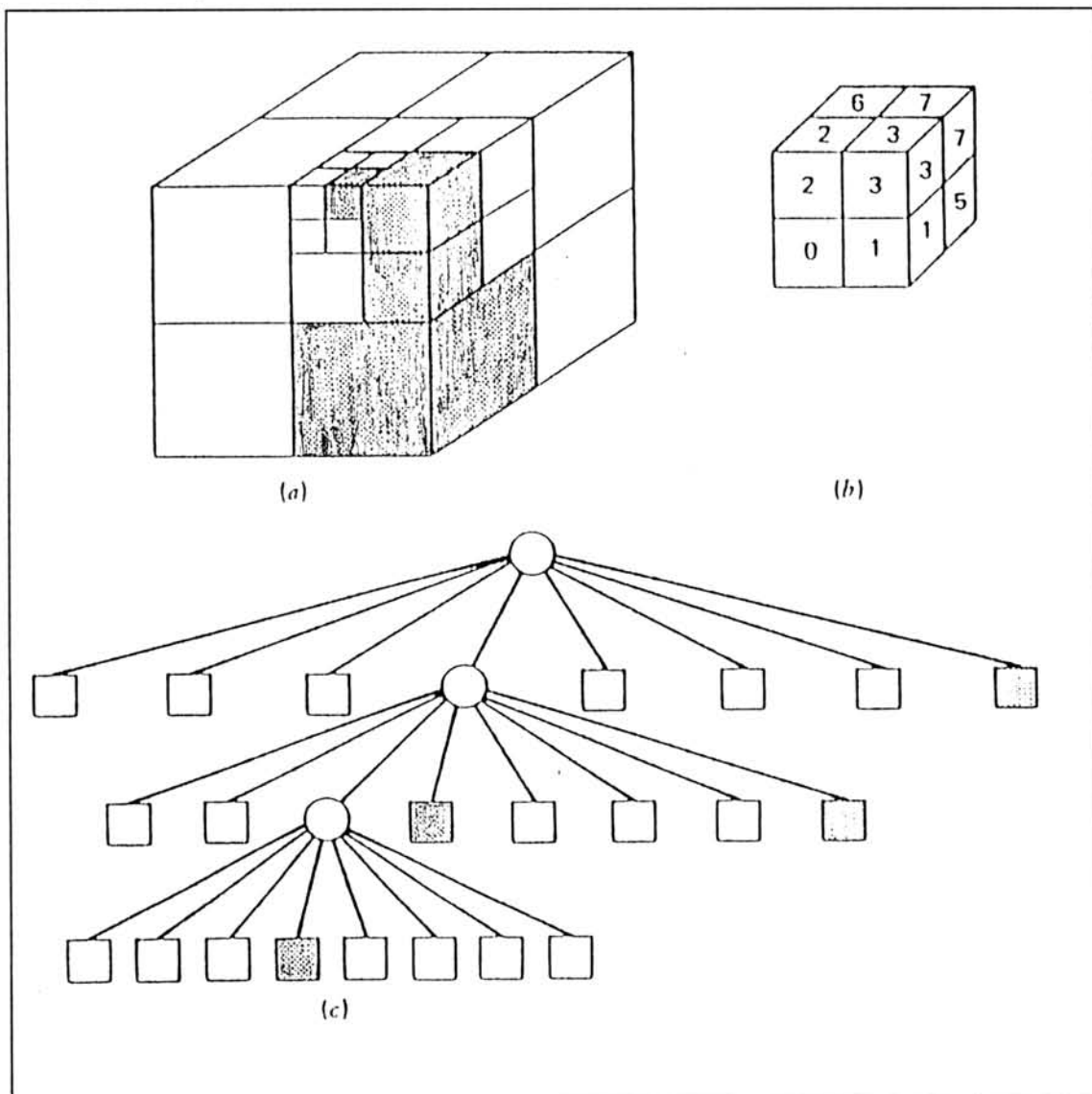


Figura 2.5 - Modelo em *Octree* [TOZ86]



Neste último caso estão os demais ramos desta estrutura, ou seja, os cubos parcialmente cheios tem no seu interior cubos cheios e vazios de menor dimensão.

Uma desvantagem deste método é relação da resolução com o consumo de memória para o armazenamento dos dados dos modelos. Para uma melhor representação de determinadas geometrias torna-se necessário o uso de células em menor dimensão, mas em maior quantidade (maior resolução), o que implica em aumento do volume de dados a serem processados.

### 2.3.3 Geometria Sólida Construtiva

A Geometria Sólida Construtiva, do inglês *Constructive Solid Geometry*, é uma representação onde os objetos são modelados através da combinação de diversas primitivas. Através de operações booleanas, como união, intersecção e diferença, estas primitivas permitem a construção de uma peça. A eficiência de um sistema CSG depende principalmente do conjunto de primitivas disponíveis. A estrutura de dados para um sistema de modelamento por CSG pode guardar informações sobre objetos relativamente complexos utilizando menor quantidade de memória que os outros métodos de modelamento, entretanto, tem como desvantagem o fato que as faces do objeto não são explícitas e a geração de figuras a partir da descrição implica a necessidade de cálculos demorados. A figura 2.6 demonstra a estrutura CSG.

### 2.3.4 Superfícies Paramétricas

A representação por superfícies paramétricas é obtida através do uso de polinômios bi-cúbicos. Existem diversas formas definidas como Bézier, Catmull, Coons, Hermite, etc. [FOL90], e cada uma delas tem um polinômio específico. Pela variação dos coeficientes e pontos de controle, pode-se obter as superfícies mais variadas. Por exemplo, a descrição de superfícies por curvas Bézier é obtida através de um produto, resultando a seguinte equação:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v)$$

onde duas funções similares de *blending*  $B(u)$  e  $B(v)$  são usadas, uma para cada parâmetro  $u$  e  $v$ .

A figura 2.7, ilustra uma superfície paramétrica obtida através da forma Bézier.

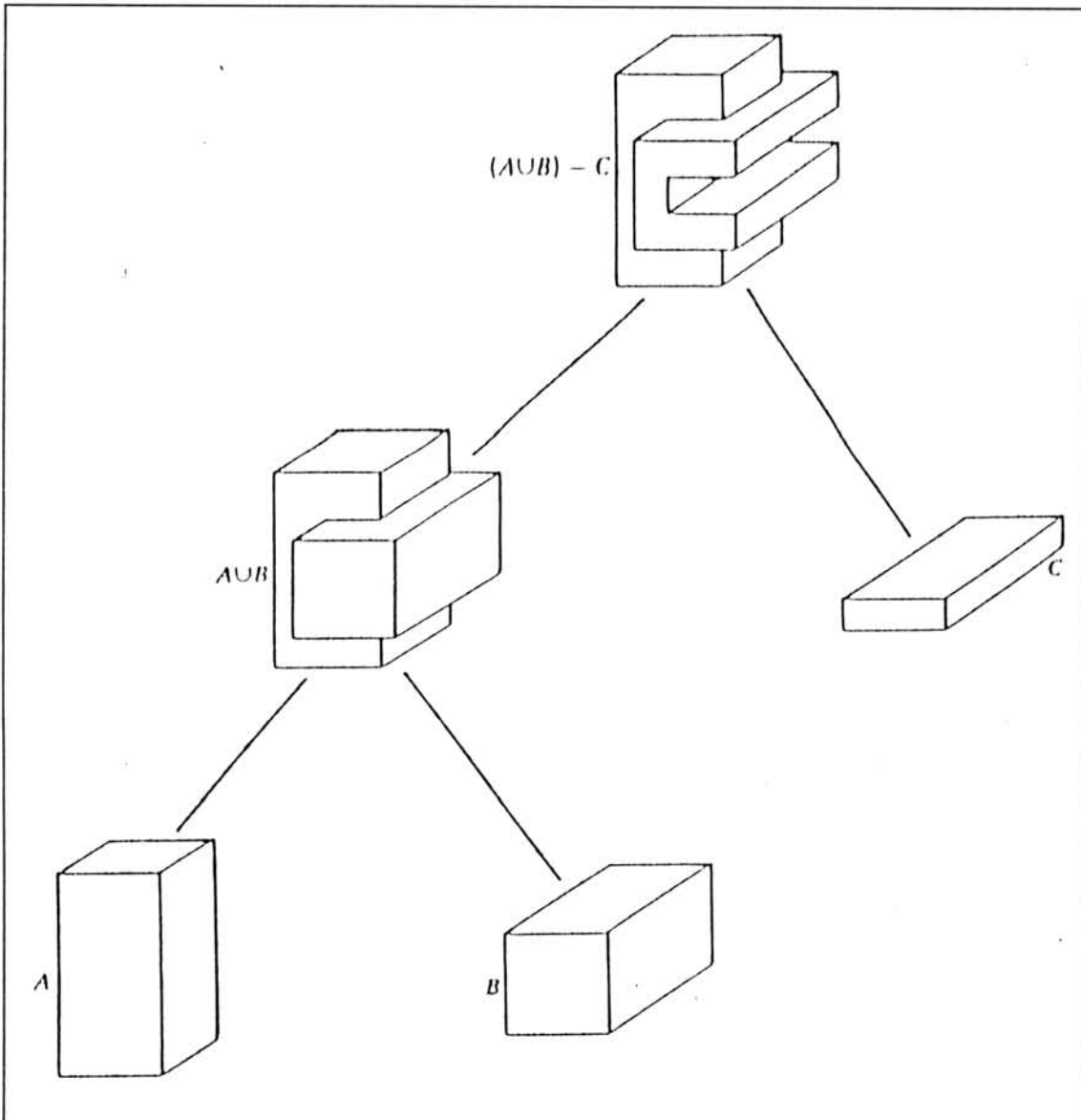
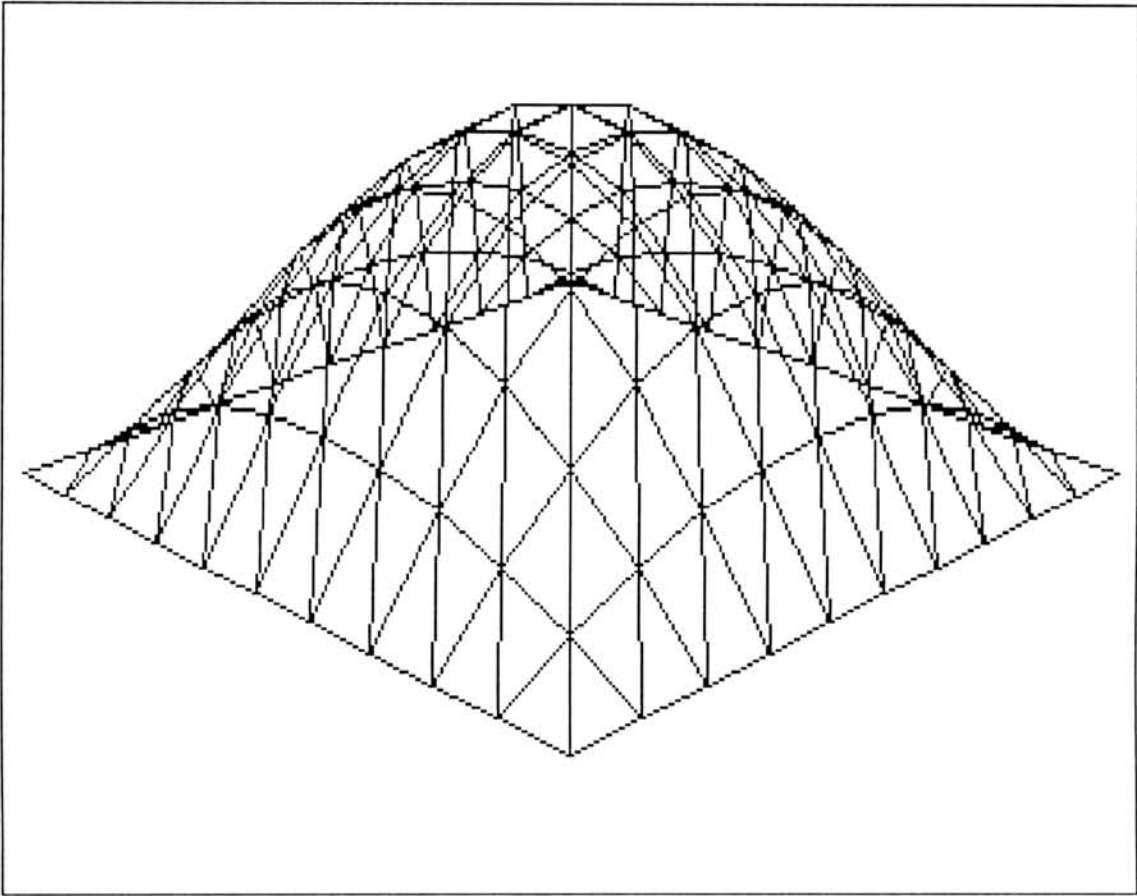


Figura 2.6 - Modelo em CSG [MOR85]

## 2.4 Sumário do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos sobre Máquinas-Ferramentas, Programação CNC e Modelagem de Superfícies. Tais informações são extremamente importantes para a compreensão dos trabalhos desenvolvidos que serão citados a seguir. Da mesma forma, são também fundamentais para o entendimento do método proposto para a geração de trajetórias de ferramentas que será detalhado no quarto capítulo.



**Figura 2.7** - Representação de uma Superfície Paramétrica

### 3 Geração de Trajetórias de Ferramentas (*Tool Paths*)

A trajetória das ferramentas, ou percurso das ferramentas, ou ainda, o caminho das ferramentas, são algumas traduções da expressão inglesa *tool path*. Portanto, neste texto usa-se esta expressão, ou algumas das traduções citadas, para tratar do conjunto de movimentos a ser executado pela ferramenta para usinar uma determinada superfície.

A geração de trajetórias das ferramentas é o assunto deste capítulo. Os sistemas de geração de programas, de simulação, de otimização, de reconhecimento de forma e os tipos de trajetórias são comentados detalhadamente.

#### 3.1 Sistemas de Geração de Programas CNC

A primeira máquina-ferramenta com Comando Numérico foi criada na década de 1950 e a linguagem de programação APT no fim desta mesma década, mas o desenvolvimento dos sistemas destinados à geração de programas CNC foi apresentado no início da década de 1970, conforme relatado a seguir.

Cremerius [CRE73] apresentou um sistema de programação CNC baseada em APT, partindo de uma interface gráfica. Neste sistema o usuário usava um monitor de vídeo para dar entrada nas informações referentes a peça a ser fabricada. Usando primitivas como retas, arcos e círculos, era definida a geometria da peça e, a partir disso, era criada uma trajetória da ferramenta de forma interativa em 2 ½ D.

No mesmo ano, Davies [DAV73] apresentou um sistema para preparação de programas CNC partindo de uma interface gráfica em 2 D. O sistema usava uma linguagem própria para a definição das geometrias a serem fabricadas.

Também em 1973, Hirano e Kira [HIR73] implementaram um sistema de geração de programas CNC para aplicação em corte a gás. Este trabalho demonstrou o interesse em otimizar a distribuição das peças de forma interativa para maior aproveitamento do material.

Outros sistemas foram apresentados em 1977, sendo, na sua maioria, sistemas interativos com representação plana. Laffret *et al.* [LAF77] criaram o ELAN, um sistema conversacional de geração, verificação e correção de programas CNC implementado em calculadoras Hewlett Packard 9830A ou 9825A. Leus *et al.* [LEU77] apresentaram um sistema chamado FRANS, destinado a programação assistida CNC para aplicação em centros de usinagem. Pikler e Simon [PIK77], Schreiter [SCH77] e Zapomueel [ZAP77] propuseram outros sistemas com características semelhantes aos anteriormente citados.

O desenvolvimento posterior de outros sistemas foi diferenciado em função do tipo de modelagem geométrica adotada. Sendo assim, os relatos a seguir demonstram algumas de suas características.

### 3.1.1 Superfícies 2 ½ D Limitadas por Retas e Arcos

Partindo do desenho plano, limitado por retas e arcos de circunferência, foi criada, inicialmente, a representação plana na tela do computador. Para a modelagem de determinadas peças foi preciso apenas uma operação chamada extrusão ou *sweeping*, que é o deslocamento de um perfil determinado por uma trajetória, que neste caso é reta, para a criação de um modelo com volume. Desta forma, surgem as geometrias de 2½ D. Este tipo de modelagem tem sido muito utilizada para a representação de cavidades arbitrárias, conhecidas por *pockets*. Para a fabricação de peças deste tipo por usinagem (com remoção de cavaco), pode-se usar uma ferramenta rotativa percorrendo a área interna ou externa ao contorno destas peças, tendo apenas uma variação da altura (profundidade) onde a ferramenta atua.

Um dos trabalhos precursores para este tipo de geometria foi o desenvolvido por Persson [PER78], que implementou um algoritmo para geração de *tool paths* de cavidades arbitrárias 2 ½ D. Seu método consistiu de 2 estágios, sendo o primeiro a divisão da cavidade em sub-áreas através da determinação de bissetrizes em seus vértices e o segundo a geração da trajetória da ferramenta referente a cada sub-área para ligação com as demais e determinação da trajetória final. Neste último estágio, para cada nível de profundidade da ferramenta, eram geradas em cada sub-área, trajetórias através do deslocamento do contorno da cavidade. Estas trajetórias, ao cruzarem com as bissetrizes, eram unidas às trajetórias de outras sub-áreas de modo a formar o *tool path* para esta cavidade. A figura 3.1 apresenta os passos propostos neste trabalho.

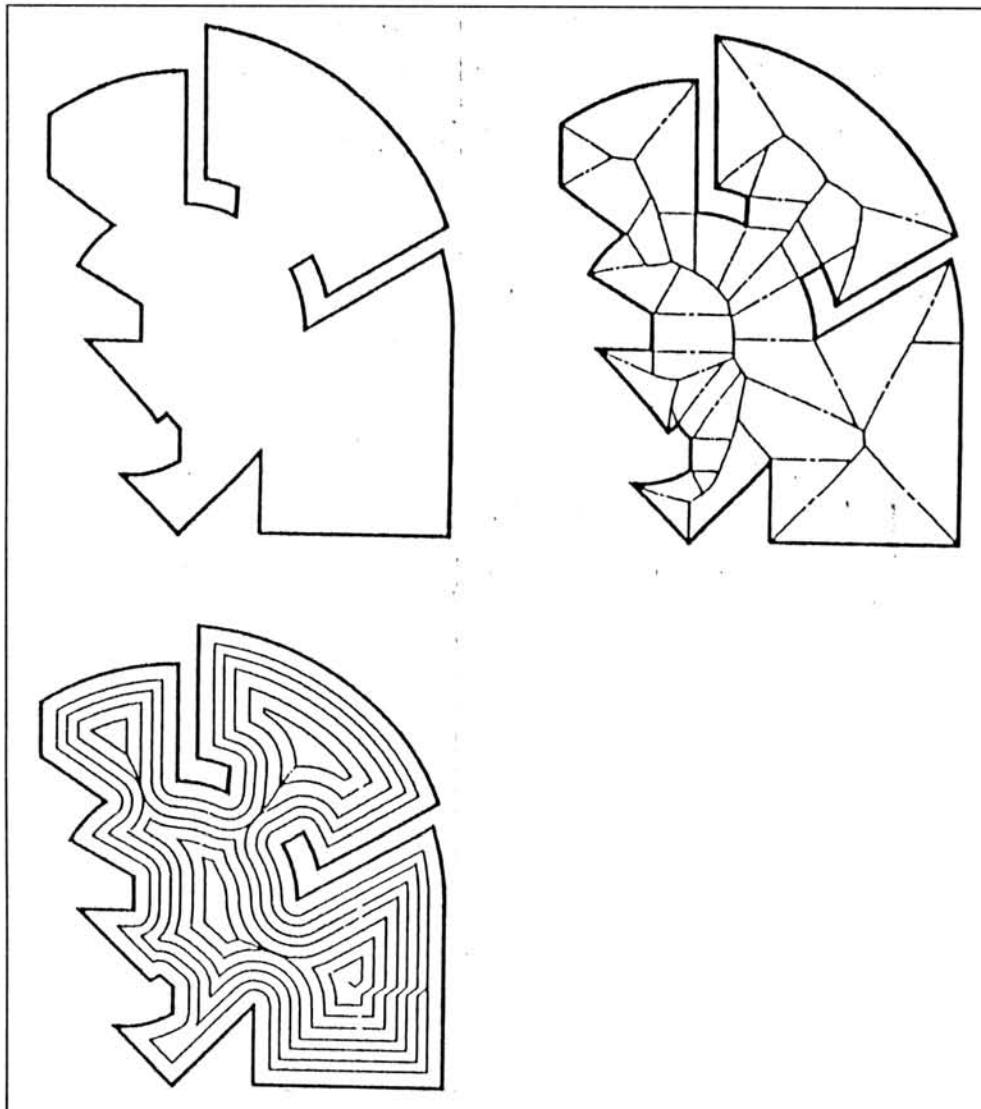
Uma restrição à forma das cavidades limita-se ao uso de retas e arcos com menos de 180°. Como resultado final é gerado um programa em linguagem ADAPT (ADaptation of APT), derivada da APT, para usinar a cavidade.

Usando modelagem poliédrica, Yeh e Ying [YEH88], propuseram um algoritmo para gerar *tool paths*. Seu método considerou uma ferramenta atuando em trajetórias paralelas. Para o desbaste são criados planos de corte e a movimentação da ferramenta se dá em apenas dois eixos visto que em cada trajetória paralela tem-se a coordenada de um eixo fixa. Para um melhor acabamento deve ser reduzido o espaçamento entre as trajetórias, bem como o diâmetro da ferramenta. Outra opção adotada é considerar as trajetórias paralelas a um outro eixo e com isso permite-se remover algumas rugosidades. A figura 3.2 ilustra a trajetória da ferramenta usando este método.

Guyder [GUY90] dedicou seu trabalho às usinagens 2 ½ D. O sistema proposto define todos os movimentos da ferramenta e reduz o número de retrações ao mínimo possível.

Em 1991, Corey e Clark [COR91] descreveram um algoritmo baseado na manipulação de um grafo face-aresta, para identificar conjuntos de faces de um objeto 2 ½ D. O algoritmo também determina o perímetro da área projetada por cada furo ou cavidade na sua direção específica para ser usado na manufatura.

Tratando de cavidades arbitrárias 2 ½ D, porém com ilhas, Hansen e Arbad [HAN92] apresentaram algoritmos para geração de *tool paths*. Estes algoritmos foram baseados em um novo método de determinação das trajetórias equidistantes ao contorno também apresentado, que evita alto custo computacional e procedimentos mais complexos como o uso de diagramas de Voronoi.



**Figura 3.1** - Passos da Geração do *Tool Path* [PER78]

Em 1993, Cota e Queiroz [COT93] apresentaram um sistema de geração de macros para usinagem de cavidades arbitrárias 2 ½ D em uma máquina com CNC. Neste caso, a entrada dos dados para a definição do perfil da cavidade pode ser feita a partir de um desenho editado num sistema CAD, como também através da introdução dos elementos do contorno, um a um, com suas coordenadas. O algoritmo proposto neste trabalho também gera um *tool path* em espiral e para isso são apresentadas metodologias para determinação dos incentros das cavidades e dos contornos equidistantes. Esta abordagem traz como vantagem à de Persson [PER78], o fato de permitir contornos com arcos maiores que 180°.

No mesmo ano, Ferreira [FER93] propôs um eficiente algoritmo de geração de *tool path* para cavidades, planos e ranhuras de 2 ½ D com geometria complexa. O método é baseado na determinação de trajetórias equidistantes ao contorno que formam uma trajetória em espiral.

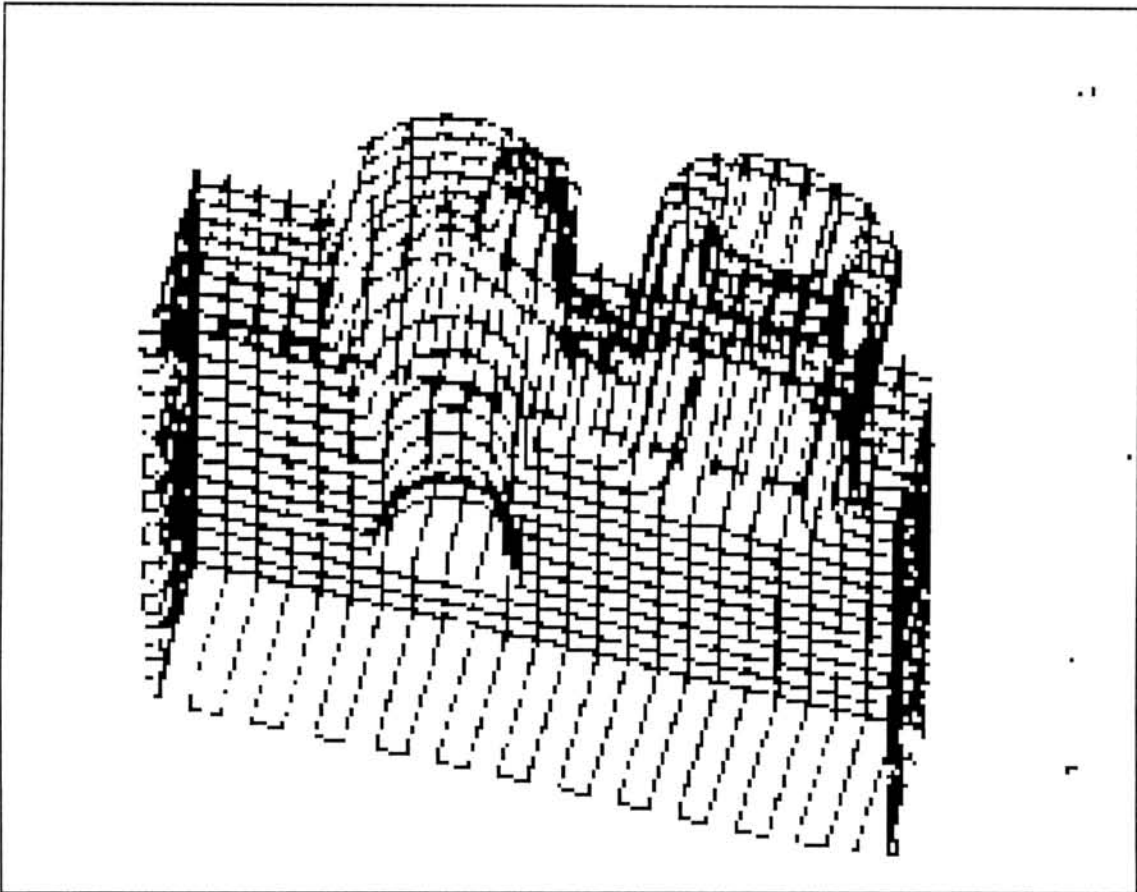


Figura 3.2 - *Tool Path* em Duas Direções [YEE88]

Em 1994, Held *et al.* [HEL94] demonstraram o uso de conceitos de geometria computacional, com Diagramas de Voronoi, para a geração de *tool paths* em forma de contornos equidistantes para usinagem de cavidades tipo *pockets*.

A maioria dos trabalhos citados acima dedicou-se ao tratamento de cavidades visto que este é um tipo de geometria bastante comum nas peças mecânicas fabricadas por usinagem. Considerando geometrias de 2 ½ D, buscou-se encontrar algoritmos que gerassem a trajetória de um círculo (ferramenta rotativa) em um plano com alguns contornos delimitando cavidades ou elevações.

### 3.1.2 Geometria Sólida Construtiva (CSG)

A Geometria Sólida Construtiva é método de modelagem geométrica muito utilizado, tendo em alguns sistemas como o GMSolid [MOR85] essa constatação. O uso deste tipo de modelagem também esteve presente nos estudos relacionados com a geração de *tool path* para máquinas-ferramentas com CNC.

Em 1985, Bobrow [BOB85] apresentou um método de geração de *tool paths* diretamente de uma representação por Geometria Sólida Construtiva (CSG). Este algoritmo requer menos interação com o usuário que os métodos APT de representação por fronteiras.

Mais tarde, Lee e Fu [LEE87] apresentaram considerações sobre CSG e como a máquina pode extrair características de um modelo geométrico.

Em 1988, Choi *et al.* [CHO88] propuseram o uso de superfícies compostas modeladas por CSG. Foram definidos 11 tipos de primitivas como poliedros, quádricas, esferas, parabolóide, etc. Considerações sobre a determinação dos pontos de contato (*CCDATA - Cutter Contact Data*) foram claramente apresentados para todos os tipos de primitivas. Sobre a geração da trajetória da ferramenta, são analisados planificação da trajetória de ferramenta usando o método cartesiano, determinação do comprimento do passo para evitar erros, determinação dos intervalos de trajetória visando um bom acabamento e detecção e remoção de interferências de ferramenta em função da combinação de superfícies diversas.

O desenvolvimento de sistemas de geração de trajetórias de ferramentas, partindo de modelos criados por CSG e que utilizam este tipo de estruturação, foi reduzido em função do pequeno uso deste tipo de modelagem devido à necessidade de reconstrução do modelo a cada alteração. Atualmente, nos sistemas de CAD, a modelagem por CSG é usada na criação dos modelos, sendo estes, porém, armazenados por uma estrutura *B-Rep*.

### 3.1.3 Octree

A modelagem por enumeração espacial também foi utilizada em alguns sistemas. Por isso, também existiram algoritmos para tratar esses modelos e gerar *tool paths* para estes modelos.

Em 1984, Yamaguchi *et al.* [YAM84] publicaram uma abordagem de geração de *tool path* de uma superfície modelada por *octree*. Neste estudo foram apresentadas considerações referentes ao contorno de peças modeladas por este método.

Considerando a etapa de desbaste, Lee *et al.* [LEE94] sugeriram um eficiente algoritmo para a geração de trajetória de ferramenta. A modelagem tanto da peça quanto do material retirado é feita por *octree*. O estudo é justificado pelo grande tempo dedicado à operação de desbaste, ou seja, 70% do trabalho. A escolha da ferramenta a ser utilizada, em função do diâmetro é determinada através da própria modelagem, ou seja, de acordo com o tamanho das células é o tamanho da ferramenta para usinar esta região.

Tal como na modelagem por CSG, não foram desenvolvidos muitos sistemas de geração de trajetórias de ferramentas considerando modelos criados por *octree*. Da mesma forma, o motivo é a pequena utilização desta forma de modelagem nos sistemas de CAD comerciais.

### 3.1.4 Superfícies Paramétricas

O método das superfícies paramétricas permite a modelagem matemática de geometrias bastante complexas através da combinação de curvas paramétricas. Por esta razão muitos estudos foram realizados usando este método.

Rogers *et al.* [ROG83] apresentaram um modelador de superfícies



paramétricas baseado em B-Splines para a criação e manipulação de superfícies usadas em navios. Este modelador também gerava o programa NC.

Em 1987, Loney e Ozsoy [LON87], criaram o protótipo de um sistema chamado de CISPA (*Computer Interactive Surfaces Pre-APT*). Usaram superfícies paramétricas e basicamente o sistema foi um módulo interativo para definição de superfícies APT.

Tratando de superfícies esculpturadas, Choi e Jun [CHO89] apresentaram um algoritmo que converte *CCDATA* em um *CLDATA* livre de interferências côncavas e convexas. Os autores apresentaram também considerações sobre o custo computacional deste algoritmo.

Em 1990, Suh e Lee [SUH90] se dedicaram à geração de *tool paths* para cavidades arbitrárias definidas por superfícies esculpturadas. Seu método permite usinar cavidades com superfícies livres côncavas ou convexas limitadas por linhas, arcos e curvas livres. O método determina o *CLDATA* diretamente com eficiência computacional sem a necessidade de iterações.

No mesmo ano, Zhu [ZHU90] descreveu um método de evitar interferência em usinagens CNC de superfícies de forma livre com uma ferramenta de extremidade cilíndrica. Em seu trabalho, dois tipos de interferências são definidos e algumas fórmulas para calcular os pontos de interferência são apresentadas.

Em 1991, Zhu [ZHU91] apresentou três algoritmos para geração de *tool paths* para superfícies esculpturadas usinadas com ferramenta de extremidade cilíndrica. Usando a modelagem por B-Splines e Coons, seus algoritmos foram desenvolvidos em função da forma paramétrica, sendo no primeiro fixado parâmetro  $u$ , no segundo fixado o  $w$  e no terceiro, tornou-se  $u=w$  e as trajetórias criadas são diagonais.

CASCAM (*Constraint-based Automatic System for Sculptured Surface Cavity Machining*) é um sistema desenvolvido por Lee e Chang [LEE91] destinado à geração de *tool paths* para usinagens de cavidades de forma livre modeladas por superfícies Nurbs. O algoritmo proposto é dividido em 3 etapas: desbaste, semi-desbaste e acabamento. A primeira etapa, desbaste, é realizada com uma ferramenta cilíndrica maior em planos de corte, em ziguezague, sendo o contorno da cavidade poligonalizado, pois não há preocupação com precisão. Com a usinagem em planos de corte, ficam degraus na cavidade, que são removidos na segunda etapa, o semi-desbaste, realizado com uma ferramenta de extremidade esférica maior. Para a finalização, a terceira etapa é realizada, o acabamento, com ferramenta de extremidade esférica menor, é usinada a forma final da cavidade, também em ziguezague.

Hwang [HWA92] apresentou um método de geração de *tool paths* livres de interferência para superfícies paramétricas compostas. Neste método as superfícies paramétricas são poligonalizadas, e da forma poliédrica criada são gerados os *tool paths*.

Catania [CAT92] propôs um sistema protótipo para usinagem NC de peças mecânicas de forma livre. O sistema permite uma modelagem direta da forma do material a ser removido partindo do modelo do material em bruto e da geometria da peça acabada. A modelagem é feita através de *patches* B-Spline por sua capacidade de desenvolver as geometrias desejadas. Neste trabalho, foram apresentados métodos de evolução de camadas de usinagem, escolha de trajetórias de ferramentas isoparamétricas, e suas aproximações. O sistema é direcionado a usinagem de desbaste e portanto é considerada a ferramenta de topo (cilíndrica) trabalhando em 3 eixos.

Zhu [ZHU93] apresentou um estudo sobre como obter um bom acabamento da superfície na usinagem CNC de superfícies livres com ferramenta de extremidade cilíndrica. Como este tipo de ferramenta não é o recomendado para o acabamento, foi proposto um algoritmo que minimiza o erro provocado por esta utilização.

Choi *et al.* [CHO94] propuseram uma arquitetura para um sistema CAM unificado para aplicação em cavidades e moldes. Neste sistema várias operações usadas em sistemas CAM foram integradas como: verificação e correção de códigos CNC, geração de código CNC partindo de um arquivo CAD, gerenciamento de informações, geração automática de códigos CNC e suporte de engenharia simultânea e inteligência artificial.

Cox *et al.* [COX94] discutem em seu artigo a aplicação de curvas de preenchimento de espaço para usinagens de superfícies esculpturadas. Neste trabalho é feita uma comparação entre *tool paths* de curvas de preenchimento, trajetórias convencionais de direção simples e trajetórias convencionais de 2 direções. Embora necessite mais testes para avaliar a eficiência das trajetórias, algumas conclusões preliminares favorecem ao *tool path* de preenchimento de superfícies.

Elber e Cohen [ELB94] modificaram um método de extração de isocurvas para *rendering* e aplicaram na geração de *tool paths*. O algoritmo adaptativo de extração de isocurvas gera uma trajetória mais exata e compacta que a trajetória isoparamétrica ou a trajetória de "intervalos constantes". Para retirar o excesso de material, também foi considerada uma usinagem em planos de corte. Como resultado, observou-se as vantagens do método que também pode ser usado em usinagem com 4 ou 5 eixos.

Li *et al.* [LI94] propuseram um algoritmo de geração automática da trajetória de ferramenta ótima, ou seja, que desse a maior produtividade. Considerações quanto aos tipos de *tool paths* foram discutidas para superfícies esculpturadas com uma ilha, podendo serem expandidas. Nesta análise utilizaram técnicas *fuzzy*.

Marshall e Griffiths [MAR94] apresentaram uma nova topologia de trajetória de ferramenta. Em seu trabalho discutiu-se os diversos tipos de *tool path*, suas características e aplicações. Sua proposta inclui um *tool path* em ziguezague na etapa de desbaste, com uma ferramenta grande para retirar o excesso de material e um *tool path* para acabamento na forma de contornos, comparados com as curvas de nível, usadas em cartografia, usando para esta etapa uma ferramenta menor. Os autores discutem também a eficiência e aplicabilidade do método proposto em superfícies de forma livre, e apresentam alguns exemplos para demonstrar seus resultados satisfatórios.

Yeung e Walton [YEU94] apresentaram um método para geração de *tool path* com um arco spline reduzindo o número de dados. Isto devido aos sistemas CAD/CAM que usavam interpolação linear na geração de *tool paths* para aproximar curvas não circulares ou perfis que são representados por um grande número de pontos.

Em 1996, Srinivas *et al.* [SRI96] apresentaram o uso de *patches* cicloidais na geração de superfícies. Tal modelagem trouxe algumas vantagens para a geração de programas CNC para a usinagem destas superfícies em trajetórias isoparamétricas, como: trajetórias formadas apenas por arcos; programas menores, consumindo menos memória e com maior rapidez de transmissão dos dados e as facilidades do uso de trajetórias isoparamétricas evitando intersecções de superfícies e outros processamentos demorados.

O interesse em desenvolver sistemas de geração de trajetórias de

ferramentas partindo de modelos criados por superfícies paramétricas é bastante grande em função da possibilidade deste método de modelar superfícies bastante complexas, com características impossíveis de obter através de outros métodos. Com este recurso tornou-se possível obter formas suaves e com menor concentração de tensões internas.

Algumas das aplicações mais difundidas do uso de modelagem através de superfícies paramétricas está na produção de peças plásticas, obtidas por injeção. Tais peças, de uso bastante variado em todos os ramos, tem as mais diferentes formas e portanto, necessitam destes sistemas para auxiliar na fabricação das matrizes para a injeção.

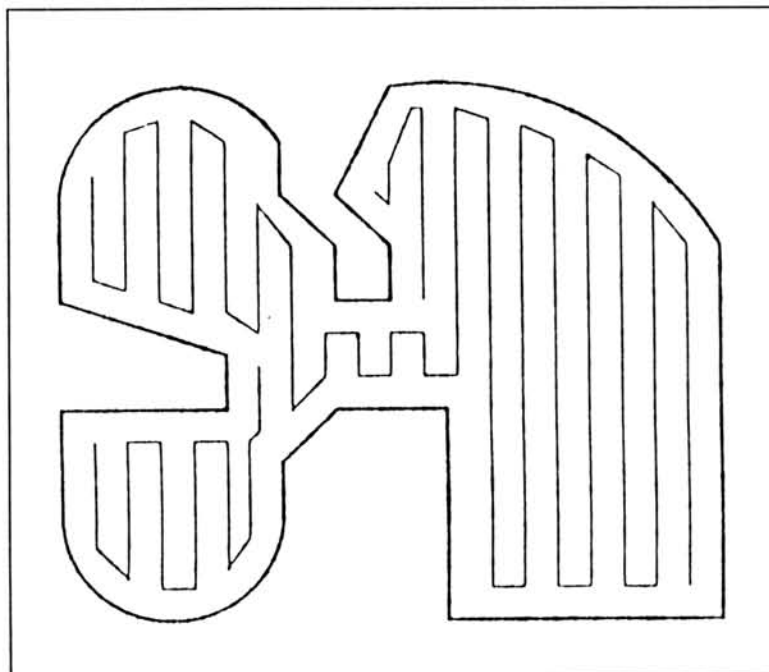
Em função dos diversos métodos de modelagem utilizados, alguns tipos de trajetórias de ferramentas foram desenvolvidos.

### 3.2 Tipos de *Tool Paths*

Os tipos de *tool paths* podem ser organizados em 4 grupos.

#### 3.2.1 Ziguezague

Trata-se de deslocamentos da ferramenta rotativa em trajetórias paralelas com um afastamento geralmente uniforme. Este tipo é muito usado em operações de desbaste, onde são usadas ferramentas de maior diâmetro e não há grande preocupação com precisão ou acabamento da superfície. A figura 3.3 mostra a forma deste *tool path*.



**Figura 3.3** - Ziguezague [MAR94]

### 3.2.2 Espiral

Com o uso voltado para cavidades, este tipo de *tool path* tem a forma de uma espiral. A usinagem é realizada do centro para o contorno, com trajetórias igualmente espaçadas. A figura 3.4 mostra a forma deste *tool path*.

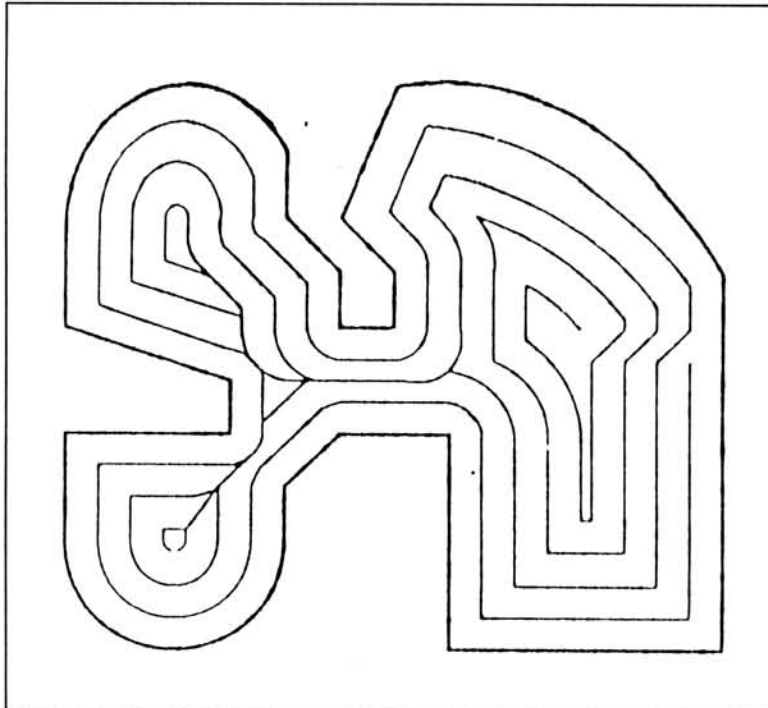


Figura 3.4 - Espiral [MAR94]

### 3.2.3 Isoparamétrico

Usado em superfícies paramétricas, este tipo de *tool path* é formado por trajetórias em ziguezague criadas através da análise paramétrica da superfície. Para algumas superfícies, este tipo tem o inconveniente de passar por regiões já usinadas devido ao fato que o espaçamento das trajetórias deve ser determinado considerando o diâmetro da ferramenta e a superfície não tem uma forma regular. A figura 3.5 mostra a forma deste *tool path*.

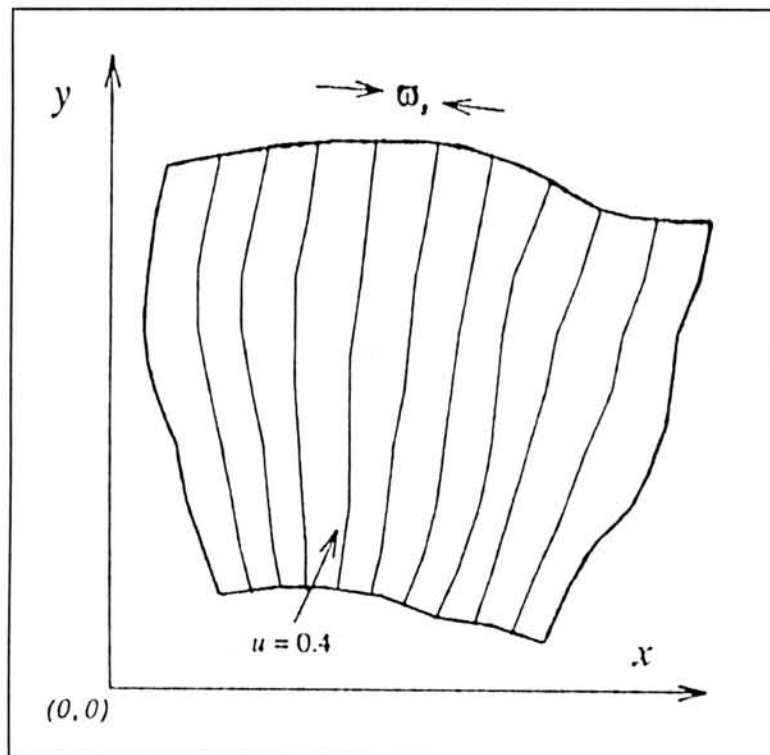


Figura 3.5 - Isoparamétrico [MAR94]

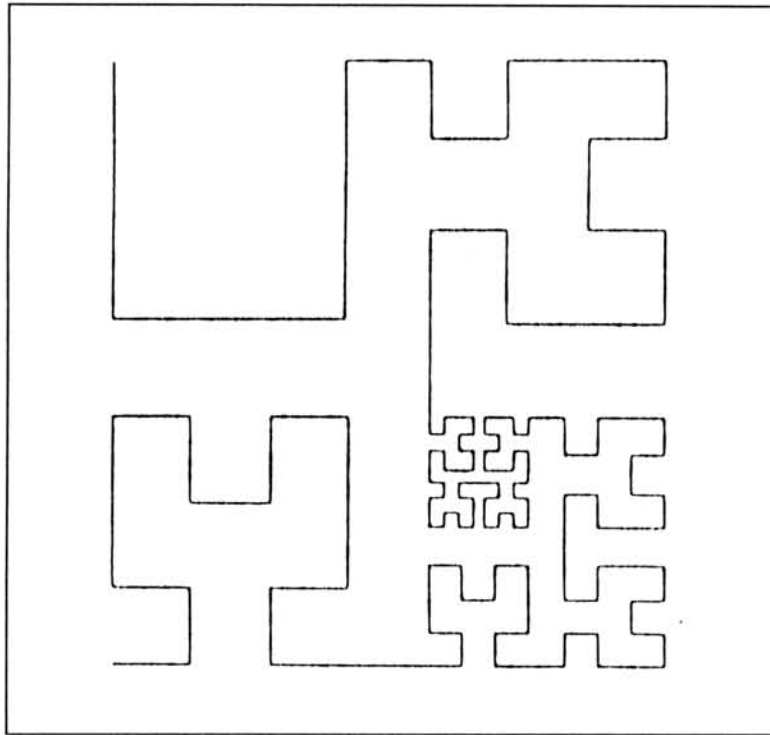
### 3.2.4 Preenchimento (*Space-filling*)

O *tool path* de preenchimento é uma abordagem relacionada ao preenchimento de uma superfície usando as curvas como Hilbert [GRI94], Moore, Palmer, etc. [COX94]. Tais curvas têm sua complexidade adaptada à complexidade da superfície da peça. Este método minimiza o tempo de movimentação da ferramenta sem cortar material e o número de reentradas da ferramenta sobre a peça. A figura 3.6 mostra um *tool path* baseado nas curvas Hilbert.

## 3.3 Otimização de Programas CNC

A geração de programas CNC, em função das diversas variações de forma das peças a serem usinadas, é bastante complicada. Como já descrito anteriormente, para cada tipo de geometria há um método mais indicado. Entretanto, o que se observa é que muitos destes métodos implementados, tanto em trabalhos experimentais como em *softwares* comerciais de CAD/CAM, não se preocupam em otimizar o programa. Os programas, em geral, são formados por um grande número de movimentos lineares de usinagem, que poderiam ser transformados em arcos de circunferência sem perder exatidão.

Por esta razão, Vickers e Bradley [VIC92] analisaram esta situação e verificaram que os programas são muito extensos e, dependendo da superfície, os segmentos de reta são muito pequenos. Este fato também promove um número excessivo de acelerações e desacelerações nos motores de cada eixo.



**Figura 3.6** - Preenchimento (Hilbert) [MAR94]

Por isso, propuseram um algoritmo recursivo para maximizar o número de interpolações circulares reduzindo, com isso, o tamanho dos programas e consequentemente as acelerações e desacelerações.

Com o mesmo propósito, Meek e Walton [MEE92], e Yeugn e Walton [YEU94], desenvolveram um método para obter *tool paths* formados por arcos e retas, conseguindo uma redução substancial na quantidade de linhas de comando. Nesta abordagem, os autores consideraram a continuidade geométrica ( $G^1$ , ver Foley *et al.* [FOL90], página 480) da trajetória gerada para um melhor acabamento da superfície.

Tratando os programas gerados em sistemas comerciais, Khan e Hayhurst [KHA91] e depois Afifi e Hayhurst [AFI95] procuraram minimizar o tempo não produtivo. Uma estratégia de segmentação do programa, em várias unidades, permitiu otimizar cada seqüência de comandos e reconstruí-lo automaticamente. No primeiro estudo dedicaram-se a reduzir o tempo em que a ferramenta fica parada, já no segundo utilizaram-se de recursos como ciclos e compensação do raio da ferramenta para reduzir a extensão dos programas.

Outro aspecto importante que certamente pode minimizar o tamanho dos programas e consequentemente o tempo de execução é a seleção otimizada das ferramentas. Segundo Cota e Gonçalves Filho [COT95], os *softwares* de geração de programas CNC comerciais mais conhecidos (APT, Compact II, Euclid, Sisgraf, AutoCam, SmartCam) dão suporte ao programador auxiliando na geração do caminho da ferramenta, mas não oferecem uma seleção automática de ferramentas. Num trabalho desenvolvido pelos mesmos autores pôde-se verificar a redução do tempo de usinagem de uma cavidade de 4,36 min para 1,39 min apenas com uma seleção otimizada das ferramentas.

### 3.4 Reconhecimento de Forma

Além dos diversos métodos de modelagem geométrica desenvolvidos, foram estudados vários métodos de reconhecimento de forma, ou seja, como identificar e manipular as superfícies de um modelo geométrico para utilizar em sistemas de CAM.

Já em 1984, Pratt [PRA84] tratou da interface entre CAD e CAM, ou seja, um sistema de planejamento automático do processo de fabricação partindo da análise de algumas características (*features*) do desenho.

No mesmo ano, Choi *et al.* [CHO84], propuseram um sistema de reconhecimento de superfícies usináveis para, a partir da determinação do tipo de geometria, gerar a trajetória da ferramenta. Para tal, classificaram sete tipos de superfícies usináveis, como furo, cavidade, contorno 2D, rasgo, degrau, superfície esculpura e plano. Para cada tipo de superfície foi desenvolvido um algoritmo de busca ou reconhecimento. Ao final concluíram ser válido tal método para automatizar o processo, verificando, porém, algumas falhas, como por exemplo: pode-se criar uma peça que não pode ser fabricada pelos métodos existentes de usinagem e pode não ser reconhecida uma superfície com dados incompletos. Sendo assim, consideraram necessária uma verificação gráfica interativa para corrigir estes problemas e também aqueles relativos à identificação de restrições e interferências.

Lee e Fu [LEE87] demonstraram uma abordagem que identifica *features* em modelos criados por Geometria Sólida Construtiva (CSG). Seu método tem duas etapas: extração e unificação. A extração de *features* é extremamente importante para a utilização em planejamento do processo de fabricação, e a unificação dessas *features* é fundamental para uma melhor representação na forma de árvores em CSG.

Joshi e Chang [JOS88] apresentaram o desenvolvimento de um algoritmo para reconhecimento de características de usinagem (*features*) de um sólido representado por fronteiras 3D. O sistema foi implementado para reconhecimento de cavidades, rasgos, furos polidéricos, ou seja, definidos por poliedros.

Shah e Rogers [SHA88] apresentaram um sistema integrado para projeto e aplicações baseado em *features*. O próprio modelador de sólidos é representado por *features*. A modelagem é feita por CSG e utiliza técnicas de inteligência artificial.

Woodwark [WOO88] discute algumas considerações sobre o reconhecimento de *features* para o planejamento do processo de fabricação. Utilizando modelagem por CSG, este autor analisa a relação entre a forma e a significância em engenharia, ou seja, a importância de tal geometria no seu projeto e/ou fabricação.

De Floriani e Bruzzone [FLO89] apresentaram um método de descrição de objetos baseados em *features* para aplicação em sistemas de planejamento de processo de fabricação.

Chuang e Henderson [CHU90] apresentaram um método de reconhecimento de padrões de forma de um sólido modelado por fronteiras 3D. O sistema utiliza classificação de vértices e arestas para esta tarefa.

Ferreira e Hinduja [FER90] implementaram um algoritmo para reconhecimento de *features* 2 ½ D em objetos modelados por fronteiras formadas por arcos e retas. Seu método consiste da determinação da cobertura convexa de cada face e conseqüente identificação da *feature* que tem esta face. A grande vantagem deste método é que considera cada face por vez e não todo o componente.

Peng *et al.* [PER90] apresentaram um método para extrair *features* usináveis de um sólido modelado por CSG. O método envolve a conversão de CSG em DSG para identificação das superfícies prismáticas usináveis. Como saída fornece atributos das *features* identificadas e possíveis faces de entrada da ferramenta.

Gardan e Minich [GAR93] apresentaram considerações sobre o uso de *features* em sistemas CAD/CAM. As abordagens de extração e modelagem baseada em *features* são discutidas.

Wang *et al.* [WAN93] apresentaram uma abordagem para extração de *features* para manufatura e a decomposição do volume usinado.

Fields e Anderson [FIE94] também desenvolveram algoritmos para extração de *features* para aplicação em usinagem. Partiram de modelagem por fronteiras e trabalharam com faces e arestas. Apresentaram algoritmos de pesquisa para identificar depressões, protrusões e outras *features*. Sua metodologia identifica além das características mais usuais, como *pockets*, furos e rasgos, algumas *features* de formas arbitrárias que formam características padrão.

### 3.5 Sistemas de Verificação e Simulação

Em função dos recursos computacionais existentes, diversas formas de promover a simulação e verificação de programas CNC foram desenvolvidas. Um estudo de Oliveira [OLI94] apresenta algumas destas abordagens. Neste trabalho pode-se verificar que a qualidade da simulação está vinculada ao custo computacional do método adotado.

Os métodos citados, que podem ser usados para simular uma máquina-ferramenta de 3 eixos, trabalham com modelagem geométrica em 3D ou com tratamento em planos selecionados.

Anderson [AND78] desenvolveu um histograma 3D para aproximar a forma do material usinado. Sua abordagem utiliza um *array* 2D de alturas, sendo a base da peça dividida em células e em cada célula é associado um valor correspondente à altura que dará ao final um aspecto da superfície. Uma limitação deste método é que não é possível representar mais de uma altura na mesma posição XY. Para a simulação, a cada movimento da ferramenta são analisadas todas as células por onde esta passa e os valores das alturas são, portanto, comparados e reduzidos se houver uma situação de corte. Logicamente, a exatidão neste caso fica limitada pela resolução, sendo que quanto menor a superfície representada, melhor o aspecto visto que cada célula corresponderá a uma dimensão menor.

A modelagem por volume varrido é importante na simulação de interferência entre um sólido se movendo e seu ambiente. Wang [WAN86] apresentou um método para modelagem de volume varrido (*sweep*) pela computação de uma família de curvas críticas de um sólido em movimento. Baseado nesta abordagem, um sistema foi desenvolvido para verificação em tempo real de trajetórias NC usando computação gráfica.

A trajetória de uma ferramenta ou peça em uma máquina CNC de 3 eixos pode ser linear ou em arcos de círculo. Desta forma, uma abordagem para a representação destas trajetórias através do desenho destas linhas foi bastante explorada por vários



autores como Crestin e Paillard [CRE73] e Queiroz e Kotujansky [QUE87].

O EDITE [QUE87] é um sistema de programação manual assistida pelo computador com simulação gráfica através da representação de 2 eixos selecionados pelo usuário. Esse sistema solicita inicialmente as dimensões das ferramentas e mostra a trajetória das ferramentas através de linhas retas e arcos, indicando um círculo com o diâmetro da ferramenta em uso a cada comando de movimentação. Essa simulação pode ser contínua ou passo a passo e apresenta um recurso adicional de limpeza da tela onde são apagados todos os movimentos de ferramenta anteriores a sua seleção visando com isso tornar mais identificável determinada movimentação específica. Isto porque as linhas que ilustram os movimentos ficam muitas vezes sobrepostas na projeção o que compromete a compreensão do usuário. Nessa abordagem são diferenciados dois padrões de linhas para indicar a movimentação em marcha rápida, para posicionamento, e de usinagem com o avanço definido no programa. Recursos auxiliares mostram na tela coordenadas da movimentação, indicação da ferramenta em uso e o tempo total da simulação. De acordo com o par de eixos selecionado para a visualização, as ferramentas cilíndricas são representadas através de círculos ou retângulos. Uma limitação deste método é que apresenta apenas a trajetória da ferramenta permitindo ao usuário verificar o resultado dos comandos enviados através da representação da ferramenta, sem possibilitar uma visualização das alterações ocorridas na peça.

O método descrito por Hsu e Yang [HSU93] utiliza uma estrutura de modelagem sólida baseada em *voxels*, denominada *z-map*, formada por um conjunto de elementos sob a forma de pilares. A altura de cada pilar é expressa por um *byte* inteiro no plano *xy*, permitindo uma representação adequada do processo de fresamento em 3 eixos. O uso da projeção isométrica se deve à simetria proporcionada, o que simplifica consideravelmente a representação. Além disso, com essa projeção, todas as superfícies de cada cubo estão ou completamente expostas ou completamente escondidas, necessitando portanto, somente os índices de cada cubo para determinação das superfícies visíveis.

### 3.6 Sumário do Capítulo

Neste capítulo são apresentados os Sistemas de Geração de Trajetórias de Ferramentas obtidos na literatura técnica. Os relatos demonstram várias tendências de desenvolvimento em função de métodos de modelagem geométrica. De acordo com a superfície tratada, alguns tipos de *tool paths* são escolhidos. As técnicas de reconhecimento de forma, através de características (*features*) são inovações que certamente vão contribuir na automatização da fabricação. Tais relatos também foram citados neste capítulo. Finalizando, são apresentados alguns métodos de simulação e verificação de programas CNC, muito usuais em programação manual e aqui utilizados na validação dos programas gerados.

De forma sintética, pode-se organizar os dados apresentados.

Sistemas de Geração de *Tool Path*:  
- função: gerar *tool path*

- baseado no modelo geométrico: cavidades, superfícies paramétricas, *octree*, CSG, etc.

#### Sistema de Simulação:

- função: simular programas
- baseado em: desenho da trajetória, volume varrido, histograma 3D, projeção isométrica, etc.

#### Reconhecimento de Forma:

- função achar plano de fabricação.
- baseado em *features* como rasgos, cavidades, contornos 2 ½ D, etc.

#### Otimização:

- função: reduzir tamanho dos programas.
- caminhos: trocar retas por retas e arcos ou selecionar mais ferramenta com diâmetros diferentes.

## 4 Abordagem Proposta

Neste capítulo são detalhados todos os aspectos relevantes da abordagem proposta, desde os equipamentos usados até uma descrição completa das etapas de usinagem tratadas nos programas CNC. As três primeiras seções tratam de *hardware* e *software*, da definição da superfície e, das máquinas e ferramentas consideradas. A quarta seção mostra todas as informações sobre o modelador de superfícies Bézier considerado. Seu funcionamento é descrito de forma bastante objetiva. A quinta seção detalha o algoritmo de geração de *tool path*. Todas as informações sobre o método de armazenamento dos dados da superfície, sobre as poligonalizações, a seleção de ferramentas, a geração de trajetórias em ziguezague ou em contorno e, a simulação gráfica são apresentadas.

### 4.1 Hardware e software utilizados

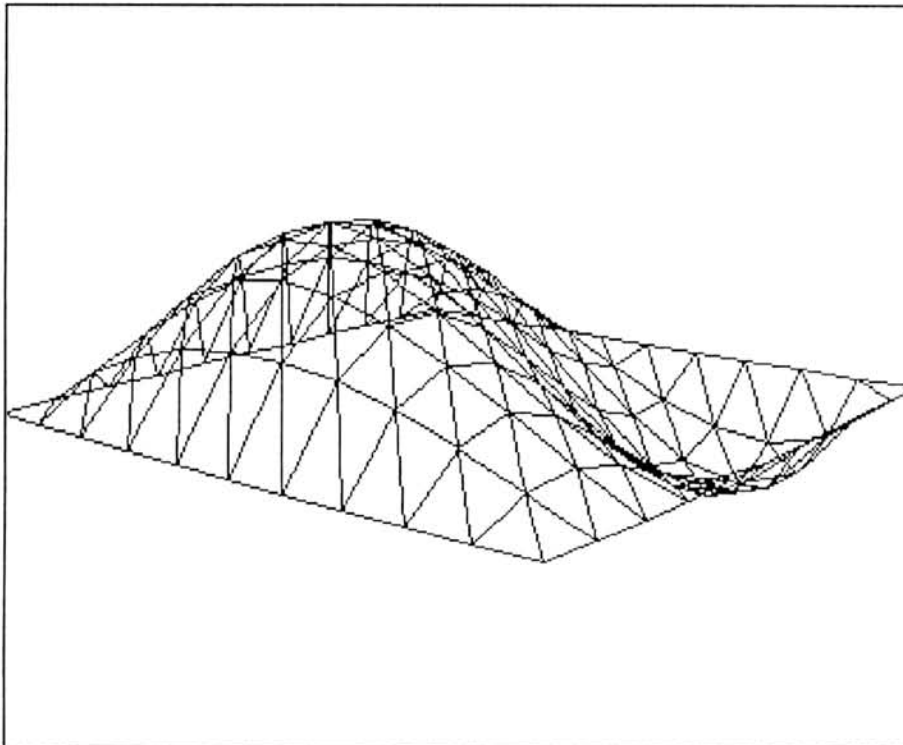
Uma das metas deste estudo foi proporcionar sua aplicação em ambiente industrial e instituições de ensino. Por esta razão foi escolhido, como equipamento de trabalho, o microcomputador do tipo IBM PC compatível. Esse microcomputador é seguramente o mais difundido tanto no meio acadêmico quanto no industrial, sendo, portanto, um equipamento satisfatório para implementar esta proposta, visto que dispõe de todos os demais requisitos para sua utilização neste trabalho.

No desenvolvimento dos programas foi utilizado um microcomputador IBM PC PS/Value Point 486 DX 33 MHz. A linguagem de programação utilizada foi Turbo Pascal, versão 6.0, pois apresenta recursos de programação gráfica satisfatórios às necessidades deste estudo.

### 4.2 Definição da Superfície - Delimitação do Trabalho

Conforme já amplamente citado na literatura, muitos trabalhos voltados a peças modeladas por seus contornos, limitadas por arcos e retas, foram desenvolvidos. Além disso, a programação CNC para este tipo de geometria não se caracteriza como a mais complicada, tendo o programa uma extensão considerável se a forma da peça tiver muitos detalhes. Já as peças formadas por superfícies de forma livre, modeladas parametricamente, apresentam uma dificuldade muito grande na sua programação, que é praticamente inviável sem um recurso computacional de auxílio.

Pelas razões citadas, consideraram-se neste trabalho as superfícies de forma livre, modeladas parametricamente pela forma Bézier, com um *patch*. Esta opção, apesar de criar algumas restrições à forma das superfícies, oferece condições de criar cavidades e protrusões de forma livre, ou combinações destes dois relevos, conforme ilustra a figura 4.1.



**Figura 4.1** - Superfície de Forma Livre

As superfícies de forma livre utilizadas apresentam dimensões máximas de 400 mm em cada eixo. Esta consideração se faz necessária para orientar o leitor quanto às dimensões das peças tratadas pelos algoritmos apresentados posteriormente. Basicamente, foi criada uma máquina-ferramenta virtual com curso máximo de 400 mm em cada eixo. Estes valores são bastante usuais para máquinas de pequeno porte.

### 4.3 Máquina-Ferramenta e Ferramentas Consideradas

As máquinas-ferramentas de 3 eixos consideradas foram as fresadoras, que são máquinas muito utilizadas na indústria mecânica em geral. Este equipamento possui movimento nos 3 eixos ortogonais, seja pela mesa ou pelo cabeçote, e através da ação de uma ferramenta rotativa pode remover material de uma peça, de modo a fabricar uma superfície de forma livre. A figura 4.2 mostra a estrutura de uma fresadora com CNC.

Esta máquina tem movimentos nos 3 eixos comandados pelo CNC, de modo que pode ser programado um movimento da ferramenta para qualquer posição do espaço limitado pelo curso de cada um dos eixos. Assim, a forma da peça é determinada pelo volume varrido pela ferramenta, ou seja, a ferramenta tem uma geometria que é geratriz e a trajetória descrita que é a diretriz. Como a ferramenta atua de forma rotativa, o material da peça é removido à medida que há um contato com as arestas de corte da ferramenta.

Neste trabalho, consideraram-se 2 tipos de ferramentas: a ferramenta cilíndrica, usada na operação de desbaste, e a ferramenta de extremidade esférica, usada na operação de acabamento. As figuras 4.3a e 4.3b mostram as geometrias das ferramentas.

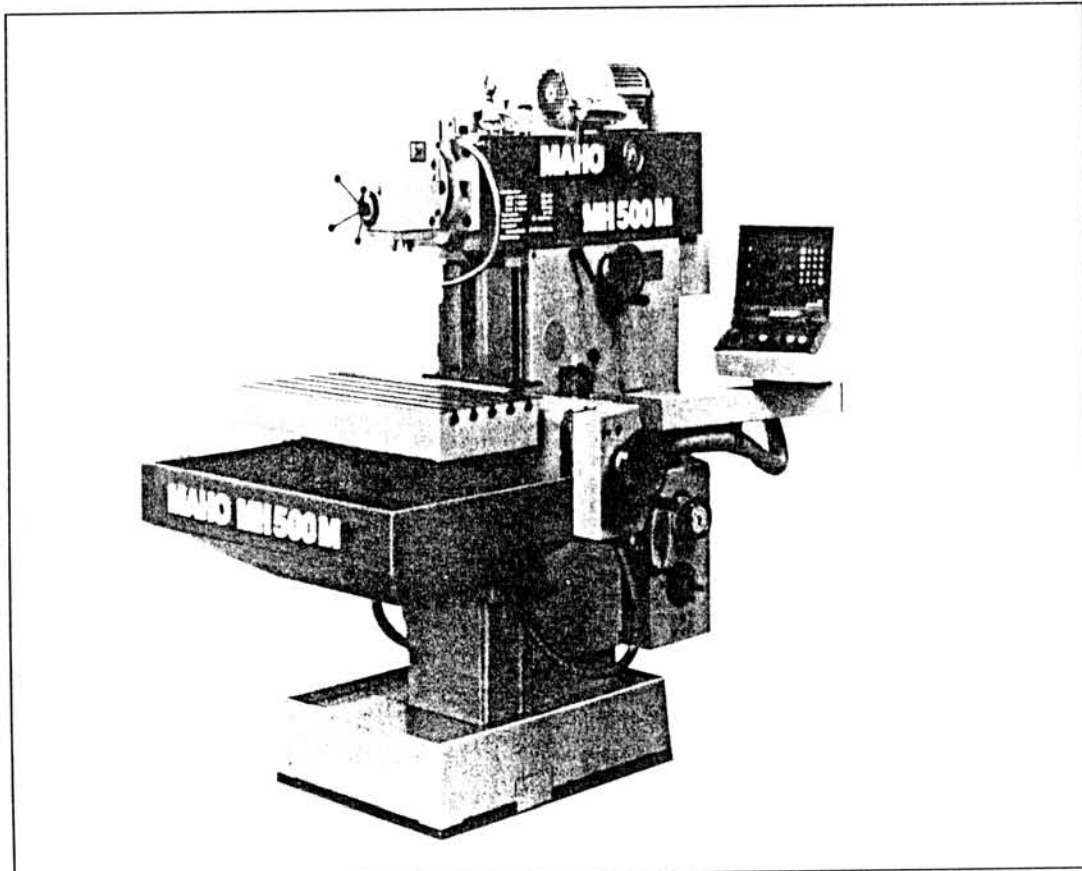


Figura 4.2 - Fresadora com CNC [INS91]

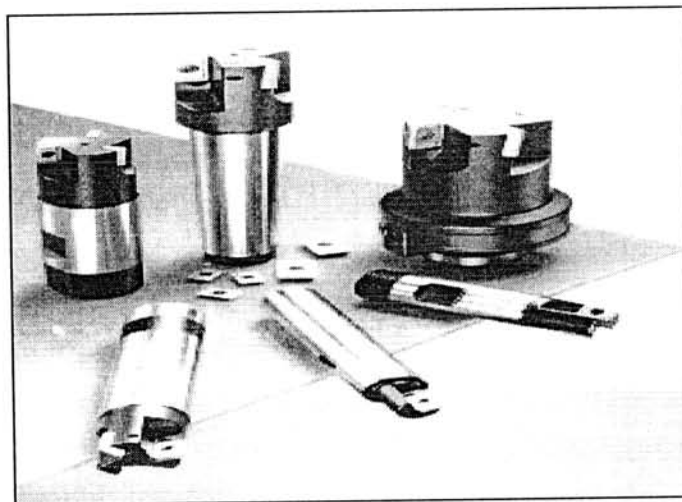


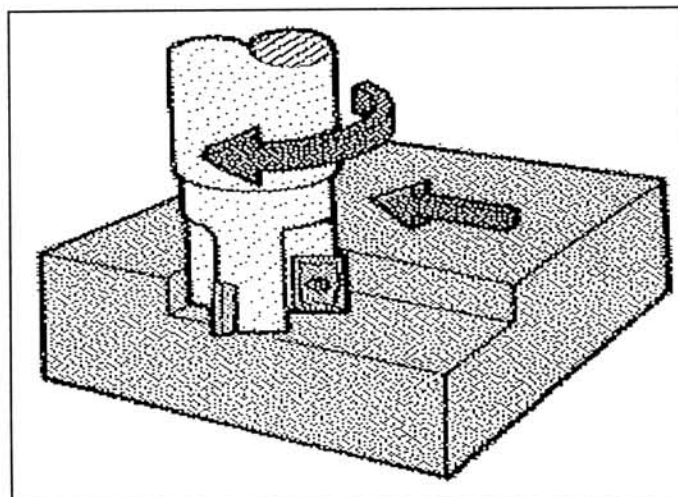
Figura 4.3a - Fresas de Extremidade Cilíndrica [SAN91]



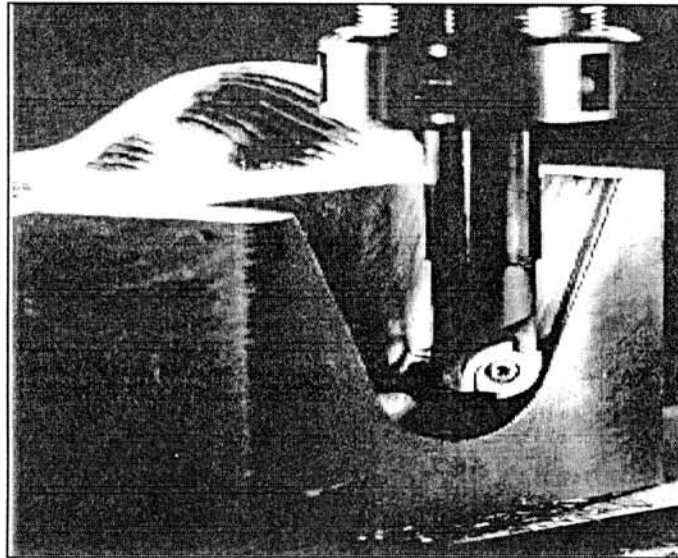
**Figura 4.3b** - Fresas de Extremidade Esférica [SAN91]

Estes dois tipos de ferramentas podem ser movimentadas axialmente, radialmente ou então em combinações das opções anteriores (trajetórias inclinadas). Em qualquer tipo de movimento deve-se considerar a velocidade de avanço e a profundidade máxima recomendada para cada combinação de material de ferramenta e material de peça. Deve-se observar também a rotação para obter a velocidade de corte recomendada.

As figuras 4.4 e 4.5 demonstram a atuação destas ferramentas durante uma usinagem.



**Figura 4.4** - Usinagem com Ferramenta de Extremidade Cilíndrica [INS91]



**Figura 4.5** - Usinagem com Ferramenta de Extremidade Esférica [SAN91]

#### 4.4 Modelador Bézier

Para a modelagem geométrica das peças utilizadas foi desenvolvido um Modelador de Superfícies Paramétricas Bézier.

Este modelador caracteriza-se como uma ferramenta para a criação das superfícies a serem analisadas pelo algoritmo de geração de *tool-paths*. Ele apresenta uma superfície pré-modelada que pode, através da ação do usuário, ter seus pontos de controle deslocados nos três eixos e, conseqüentemente, sua geometria alterada.

##### 4.4.1 Superfícies Paramétricas Bézier

A superfície paramétrica Bézier, neste modelador, é determinada pela seguinte equação, segundo Mortenson [MOR85]:

$$P(u, w) = [(1-u)^3 \quad 3u(1-u)^2 \quad 3u^2(1-u) \quad u^3] P \begin{bmatrix} (1-w)^3 \\ 3w(1-w)^2 \\ 3w^2(1-w) \\ w^3 \end{bmatrix}$$

sendo  $u$  e  $w \in [0,1]$ , onde

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix}$$

é a matriz 4x4 formada pelos 16 vértices do poliedro de controle de um *patch*. Este procedimento é realizado para cada eixo.

Conforme Mortenson [MOR85], uma superfície paramétrica Bézier não necessita ser representada unicamente por 16 pontos de controle, assim como uma curva Bézier não precisa ser representada sempre por 4 pontos de controle. Neste sistema, adotou-se esta forma como padrão, sendo todos os programas estruturados para 16 pontos de controle.

#### 4.4.2 Estrutura do Modelador

O Modelador Bézier implementado tem o ambiente ilustrado pela figura 4.6.

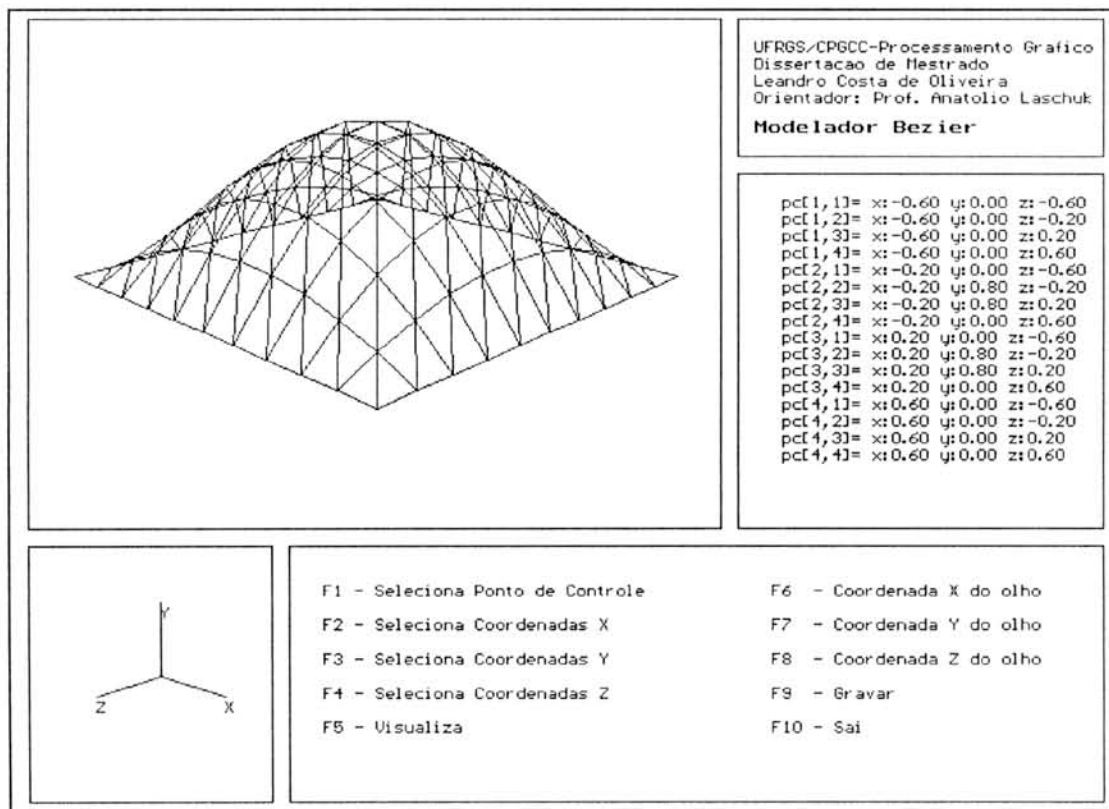


Figura 4.6 - Modelador Bézier



Os 16 pontos de controle têm suas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  apresentadas em uma janela, enquanto que em outra a superfície é representada através de um poliedro. Esta superfície é definida apenas por 16 pontos de controle, e portanto, a estrutura de dados tem as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  desses pontos.

Para modelar a superfície, o usuário pode alterar a posição dos pontos de controle. Isto é feito através do teclado, usando as teclas de função para seleção e as setas para alterar a opção selecionada.

A tecla F1 ativa seleção do ponto de controle e através das setas, pode-se escolher o ponto desejado.

As teclas F2, F3 e F4 ativam a seleção da coordenada a ser manipulada, sendo  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente.

A tecla F5 serve para visualizar a superfície após as alterações serem realizadas. Ao toque desta tecla, a superfície é redesenhada.

Para facilitar o trabalho de modelagem, foi implementada uma câmera sintética que permite ao usuário alterar as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  do ponto de visão (olho), através das teclas F6, F7 e F8, respectivamente.

A tecla F9 grava os 16 pontos de controle em um arquivo para que esta superfície possa ser tratada posteriormente na geração do *tool-path*.

A tecla F10 permite abandonar a execução deste programa.

O fluxograma da figura 4.7 demonstra o funcionamento deste modelador.

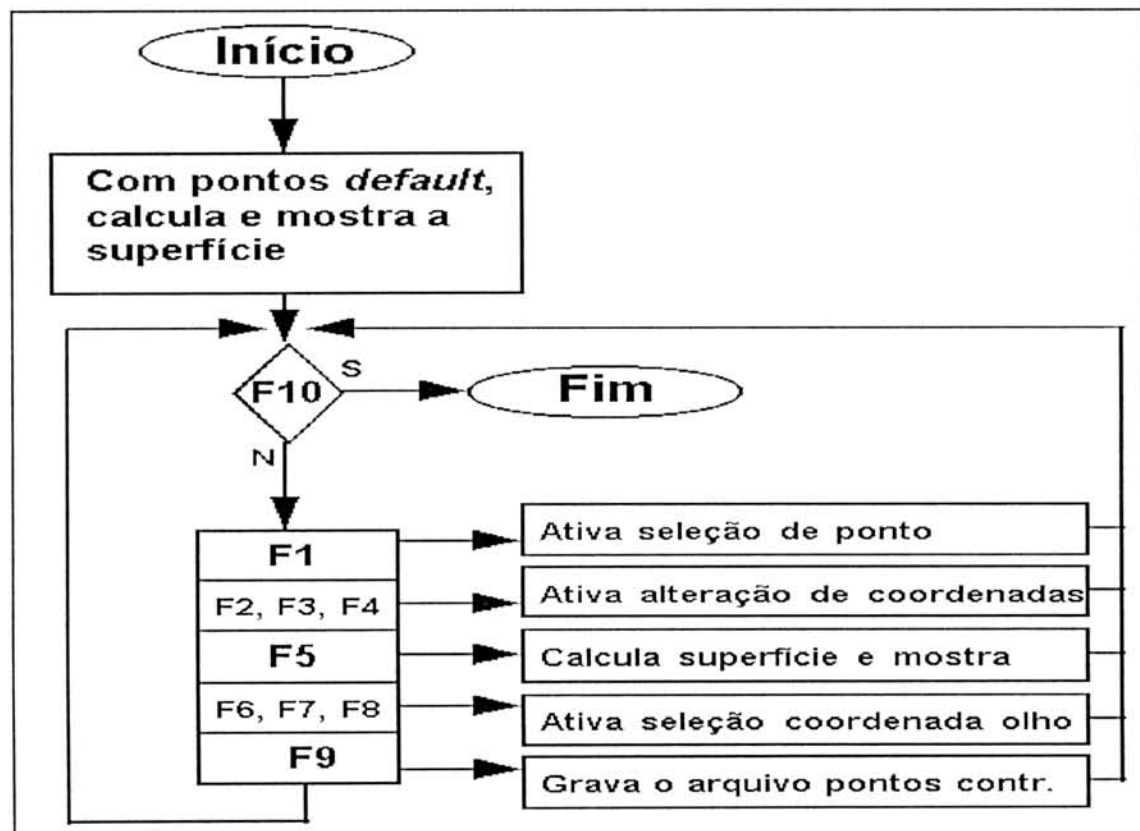


Figura 4.7 - Fluxograma do Modelador Bézier

## 4.5 Algoritmo de Geração do *Tool Path*

Este algoritmo foi desenvolvido para gerar *tool paths* para usinar superfícies de forma livre modeladas pela forma Bézier.

Devido à forma da superfície, consideraram-se duas etapas para sua usinagem, sendo primeiramente o desbaste e, posteriormente, o acabamento. Para estas duas etapas foram definidas ferramentas diferenciadas. O desbaste é realizado com uma ferramenta de extremidade cilíndrica em vários planos de corte, e o acabamento com uma ferramenta de extremidade esférica em zig-zague sobre toda a superfície. O fluxograma da figura 4.8 ilustra todos os procedimentos deste algoritmo, que serão descritos nas seções seguintes.

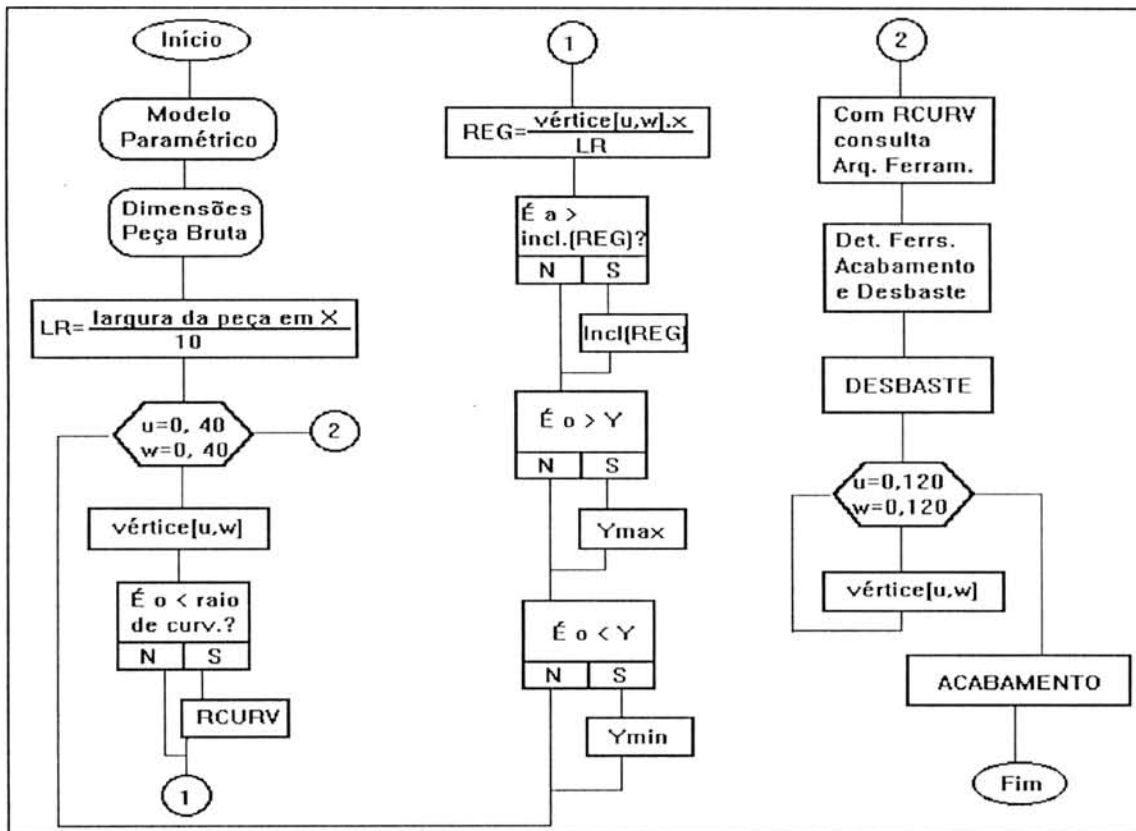


Figura 4.8 - Fluxograma do Algoritmo de Geração de *Tool-Path*

O usuário fornece ao sistema o modelo paramétrico, através dos 16 pontos de controle e, as dimensões da peça bruta, em forma de paralelepípedo, por valores de  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Com estes dados, determina-se  $LR$ , que é o valor da largura de cada uma das 10 regiões que são criadas segundo o eixo  $x$ . A superfície é dividida em 10 regiões para que o espaçamento entre as trajetórias da ferramenta, na etapa de acabamento (ver seção 4.5.6.2), seja definido em função das inclinações desta superfície em cada região. O valor de 10 regiões foi escolhido por ser um valor pequeno e não consumir grande quantidade de memória com as informações das regiões.

A seguir, são calculadas as coordenadas dos vértices da superfície

poliédrica gerada na primeira poligonalização (ver seção 4.5.2). Neste laço são, também, determinados os valores de máxima inclinação  $Incl[REG]$ , para cada região  $REG$ , o menor raio de curvatura  $RCURV$  para toda a superfície (ver seção 4.5.2.2) e os valores máximos e mínimos de  $y$ .

Com o valor do menor raio de curvatura consulta-se o arquivo de ferramentas para a seleção da maior ferramenta de extremidade esférica que pode ser usada (ver seção 4.5.3.1). A seguir, determina-se a ferramenta de extremidade cilíndrica usada no desbaste (ver seção 4.5.3.2).

Com as ferramentas escolhidas, a primeira etapa da usinagem, o desbaste, é então considerada. A figura 4.9 ilustra o fluxograma desta etapa (ver seção 4.5.5).

Usando a malha de 40 por 40 e o valor do diâmetro da ferramenta de desbaste, são determinadas trajetórias paralelas ao plano  $yz$  até encontrar uma protrusão, ou no interior de uma cavidade. Estas trajetórias são, então ordenadas de modo a tornar o movimento da ferramenta alternado na direção do eixo  $z$ . A seguir, é determinada uma trajetória de ferramenta equidistante ao contorno da cavidade ou protrusão existente. Para isso, faz-se a ordenação das arestas do contorno para que os movimentos sejam, então, determinados a partir destas arestas.

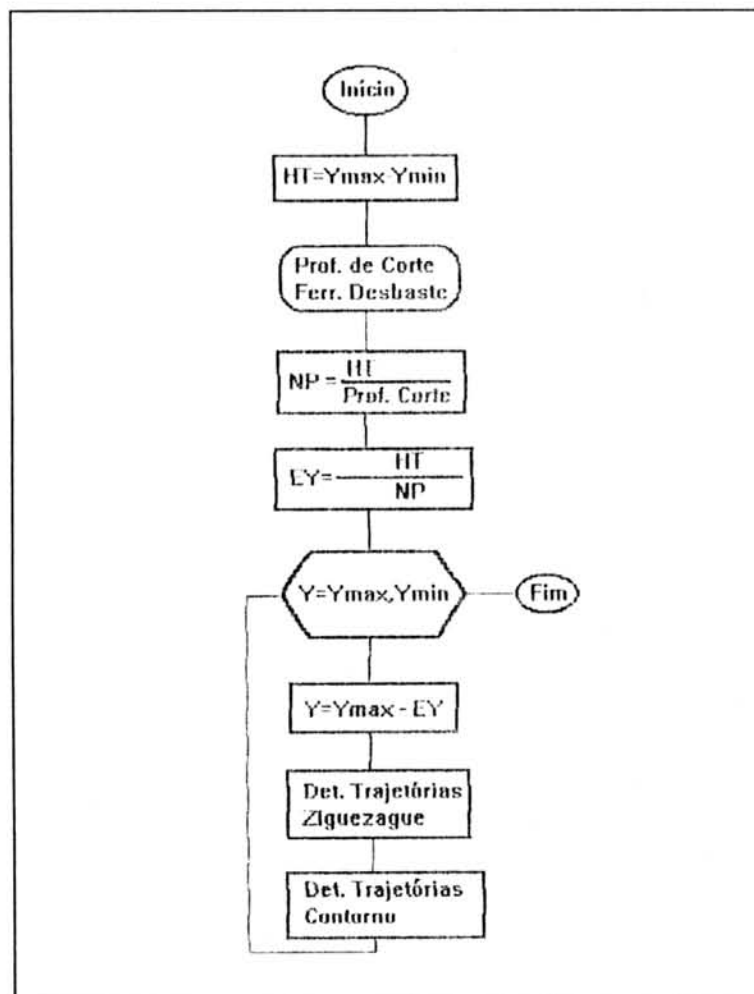


Figura 4.9 - Fluxograma do Desbaste

A etapa de acabamento (ver seção 4.5.6) é executada a partir de uma superfície poliédrica de 120 por 120 vértices, criada na segunda poligonalização (ver seção 4.5.6.1). Com estes vértices e, com os valores das inclinações para cada região, são determinadas trajetórias paralelas ao plano  $yz$ . O espaçamento entre estas trajetórias é função da inclinação máxima em cada região. Com a intersecção destas trajetórias com as arestas da superfície poliédrica são determinados os pontos de contato da ferramenta, o *CCDATA* (ver seção 4.5.6.3). Neste ponto é calculado o vetor normal à superfície e a partir deste vetor é determinada a posição da ferramenta, o *CLDATA* (ver seção 4.5.6.4). Este valor é então gravado como comando de movimentação da ferramenta. A figura 4.10 mostra este fluxograma.

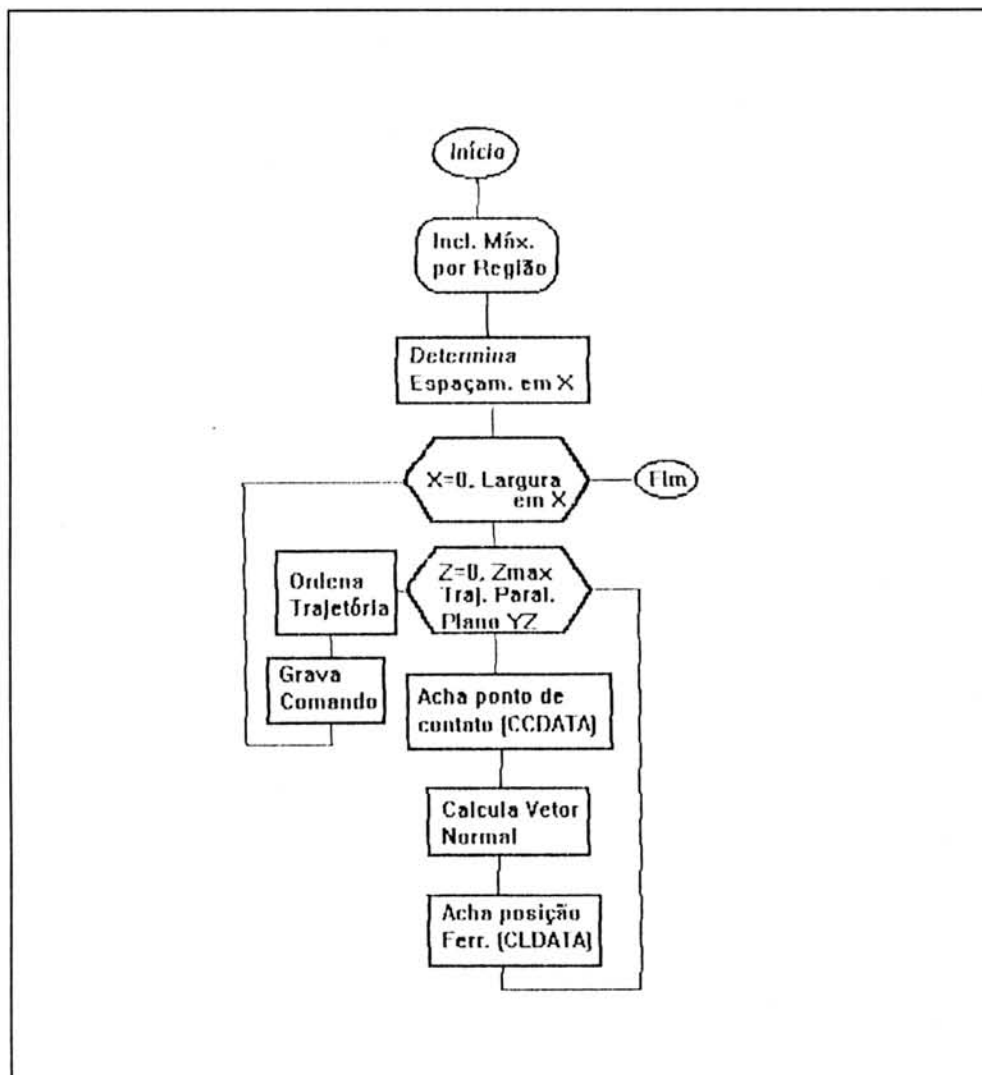


Figura 4.10 - Fluxograma do Acabamento

Para a correta determinação das trajetórias das ferramentas, é indispensável considerar os sistemas de referência utilizados na programação de máquinas com CNC.

#### 4.5.1 Sistemas de Referência

A máquina-ferramenta considerada neste trabalho utiliza o sistema de referência mão direita. No sistema de referência mão direita o primeiro dedo, o polegar, representa o eixo  $x$ , o segundo dedo representa o eixo  $y$  e o terceiro dedo representa o eixo  $z$ . Os algoritmos foram implementados com este sistema e os modelos criados no Modelador Bézier também satisfazem esta condição. Aqueles modelos gerados em outros modeladores deverão obedecer a esta condição para que possam ser tratados corretamente. Este sistema de referência foi escolhido por considerar o eixo  $y$  na vertical. As máquinas-ferramentas com CNC utilizam, entretanto, o sistema de referência tendo o eixo  $z$  na vertical, sendo que  $x$  e  $y$  determinam um plano normal a  $z$ . Para o posicionamento da ferramenta através de programação deve-se observar as definições do zero-máquina e do zero-peça.

##### 4.5.1.1 Zero-Máquina

O sistema de referência da máquina-ferramenta tem origem num ponto chamado **zero-máquina**. Este ponto é uma referência física da máquina e a montagem da peça na mesa de trabalho, bem como a própria programação para usinagem desta estão vinculados a esta origem.

##### 4.5.1.2 Zero-Peça

O **zero-peça** é a origem do sistema de referência adotado no modelo geométrico. Com relação a este ponto são definidos todos os comandos relativos a posicionamentos, independente da máquina que será utilizada para a fabricação desta peça. A relação entre as posições do zero-máquina e zero-peça é feita via programação, onde é informada a posição relativa do zero-peça no sistema de referência da máquina. A partir desta definição, realizada pelo comando G53, todos os comandos são introduzidos considerando o sistema de referência da peça.

#### 4.5.2 Primeira Poligonalização

Partindo de um modelo paramétrico da superfície, definido por 16 pontos de controle, cria-se uma superfície poliédrica inicial, usada na etapa de desbaste, com malha 40 por 40, ou seja, 1600 vértices. Esta resolução, 40 por 40, foi escolhida por ser 40 um sub-múltiplo de 400, que é o valor em mm da maior dimensão possível em cada eixo, para o domínio de peças considerado. Este fato indica que na máxima dimensão e com pontos de controle equidistantes, a superfície poliédrica terá vértices espaçados de 10 mm. Nesta operação, realizada usando intervalos isoparamétricos no polinômio bicúbico da forma Bézier, determina-se o menor raio de curvatura da superfície e os valores de maior inclinação em dez regiões selecionadas segundo o eixo  $x$  para utilização na etapa de acabamento.

#### 4.5.2.1 Determinação das Maiores Inclinações

Conforme será comentado posteriormente, na etapa de acabamento (ver seção 4.5.6) são criadas algumas trajetórias paralelas ao plano  $yz$  para a geração do *tool path*. Com o objetivo de otimizar a quantidade destas trajetórias torna-se necessário analisar as inclinações existentes na superfície segundo o eixo  $x$ . A superfície é, então, dividida nesta direção em 10 regiões, sendo que em cada uma é calculada a maior inclinação da superfície neste intervalo. Estes valores são armazenados para utilização na determinação do espaçamento entre as trajetórias em ziguezague da etapa de acabamento. A divisão em 10 regiões foi escolhida por ser este um valor pequeno, ocupando pouco espaço de memória para armazenar os valores de inclinação.

#### 4.5.2.2 Determinação do Raio de Curvatura

A determinação do menor raio de curvatura da superfície paramétrica permite selecionar a maior ferramenta de extremidade esférica que pode ser utilizada para usinar esta superfície. Deve-se observar que este valor se refere apenas às cavidades, pois a ferramenta para usiná-las deve estar dentro das mesmas. Da Geometria Diferencial, o raio de curvatura  $\rho$  é calculado pela seguinte equação [FAU79]:

$$\rho = \frac{\left( \left( \frac{dp_x(u, w)}{du} \right)^2 + \left( \frac{dp_y(u, w)}{du} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{dp_x(u, w)}{du} \cdot \frac{d^2p_y(u, w)}{du^2} - \frac{d^2p_x(u, w)}{du^2} \cdot \frac{dp_y(u, w)}{du}}$$

onde  $p(u, w)$  é o polinômio da forma Bézier, apresentado na seção 4.4.1, derivado em  $u$  para a determinação dos raios de curvatura com relação a  $xy$ . O mesmo procedimento é realizado, derivando em  $w$  para a determinação do raio de curvatura em  $yz$ , sendo então selecionado o menor valor encontrado para utilização na seleção das ferramentas de corte.

#### 4.5.3 Seleção das Ferramentas de Corte

A maior ou menor rapidez da usinagem de uma peça ou a qualidade do acabamento da sua superfície são características vinculadas diretamente à dimensão da ferramenta de corte usada, já que neste estudo não são consideradas as condições de corte como velocidade e avanço.

A seleção das dimensões das ferramentas recomendadas, para usinar determinada peça, é uma tarefa bastante complexa. Pode-se avaliar situações separadamente e determinar um valor para uma etapa específica que não seja o melhor para uma etapa posterior. Devem-se considerar os tempos passivos para posicionamento e troca de ferramentas.

Neste sistema optou-se pela utilização de uma ferramenta para cada uma das duas etapas de usinagem a serem realizadas. Esta opção visa reduzir a complexidade dos algoritmos, visto que a utilização de mais ferramentas de dimensões diferentes poderia exigir um grande número de restrições para evitar um maior tempo de processamento e a troca excessiva de ferramentas.

Sendo assim, a seleção das ferramentas inicia-se com a escolha da ferramenta de extremidade esférica usada na etapa de acabamento, pois sua dimensão está intimamente ligada à forma final da peça a ser trabalhada. A partir deste valor, se determina a ferramenta de desbaste, que é usada na primeira etapa da usinagem.

#### 4.5.3.1 Seleção da Ferramenta de Acabamento

Tendo o valor do menor raio de curvatura da superfície em cavidades, como foi mostrado na seção 4.5.2.2, basta consultar o arquivo de dados de ferramentas para selecionar a ferramenta de extremidade esférica a ser usada. Podem ser utilizadas as ferramentas cujos diâmetros sejam menores que o dobro do menor raio de curvatura da superfície.

#### 4.5.3.2 Seleção da Ferramenta de Desbaste

A seleção da ferramenta de extremidade cilíndrica, a ser usada na operação de desbaste, é função da profundidade de corte máxima permitida para as ferramentas disponíveis. Como esta operação é realizada em planos de corte, torna-se necessário saber qual a maior distância entre cada plano de corte. Isto é feito considerando duas condições:

- A distância entre os planos de corte deve ser menor que a profundidade máxima da ferramenta de extremidade cilíndrica escolhida;

- Como a ferramenta de acabamento já está definida, pode-se verificar se a distância entre os planos de corte não deixará degraus muito grandes, impossíveis de serem removidos de uma só vez por esta ferramenta.

Neste caso, a pior situação seria um ângulo de 45° da superfície que proporcionaria um degrau onde a normal à superfície deve ser no máximo igual ao raio da ferramenta de extremidade esférica.

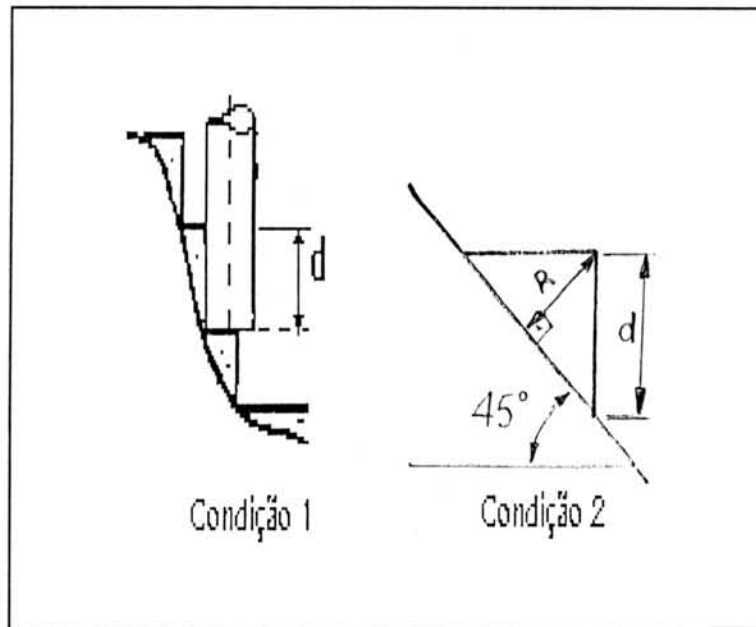
A figura 4.11 ilustra as duas condições citadas.

Pela segunda condição, o maior espaçamento entre os planos de corte deverá ser igual a

$$d = \frac{R}{\cos 45^\circ},$$

sendo R o raio da ferramenta de extremidade esférica.

Com este valor, consulta-se o arquivo de dados de ferramentas para selecionar a ferramenta de desbaste a ser usada.



**Figura 4.11** - Condições para a Seleção da Ferramenta de Desbaste

#### 4.5.4 Arquivo de Dados de Ferramentas

Este arquivo de dados contém as informações necessárias ao sistema. Dele constam:

- a) O tipo de ferramenta: se a extremidade é cilíndrica ou esférica;
- b) O diâmetro da ferramenta em milímetros;
- c) A velocidade de corte para aço e alumínio, obtida em catálogos, sendo função do material da ferramenta;
- d) A maior profundidade de corte: igual ao raio para as ferramentas de extremidade esférica e com o valor recomendado pelo fabricante para ferramentas de extremidade cilíndrica.

Estes itens citados acima são satisfatórios para o funcionamento do algoritmo.

Na seqüência, vem a geração da trajetória da ferramenta para a etapa de desbaste.

#### 4.5.5 Etapa de Desbaste

Como as peças são obtidas partindo de um bloco em forma de paralelepípedo, é nesta operação que é removida a maior quantidade de material da peça. Portanto, é a etapa onde o objetivo é remover a maior quantidade de material em menor tempo, sem considerar o aspecto final, pois a operação seguinte, de acabamento, é destinada a isso.

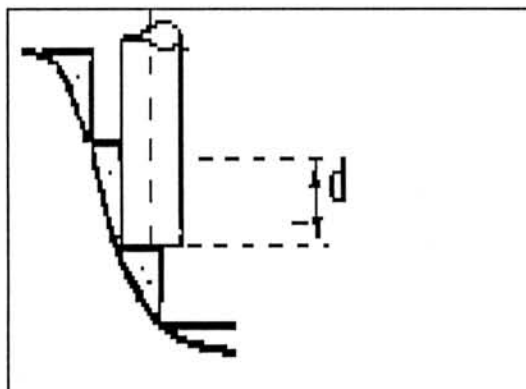
Para retirar esta quantidade de material, é usada uma ferramenta de forma cilíndrica atuando em planos de corte, sendo recomendado usar o maior diâmetro permitido para reduzir o número de passagens sobre a peça.



#### 4.5.5.1 Determinação dos Planos de Corte

Conforme recomendação do fabricante, a ferramenta pode usinar em uma determinada profundidade de corte  $e$ , dependendo do material a ser usinado, ela terá uma rotação específica para atingir a velocidade de corte recomendada e, para que haja a alimentação do corte, tem-se que determinar a velocidade de avanço para cada deslocamento. Estas características de usinagem contribuem grandemente para uma maior duração da ferramenta, menor esforço da máquina e conseqüentemente menor risco de dano à peça.

A metodologia adotada para remover o material nesta etapa foi determinar planos de corte, espaçados em função da profundidade máxima recomendada à ferramenta. Assim, nesta etapa, tem-se o número de planos de corte a ser determinado igual à diferença entre o ponto mais alto da peça bruta e o ponto mais baixo da superfície externa da peça, divididos pela maior profundidade que a ferramenta pode usinar, como mostra a figura 4.12.



**Figura 4.12** - Profundidade Máxima Recomendada para a Ferramenta de Corte

Portanto, sendo  $n$  o número de planos de corte encontrados e  $d$  a profundidade de cada plano, tem-se:

$$n = \frac{\textit{altura máxima} - \textit{altura mínima}}{\textit{profundidade máxima ferr.}}$$

Logo, para uma distribuição uniforme dos esforços, tem-se:

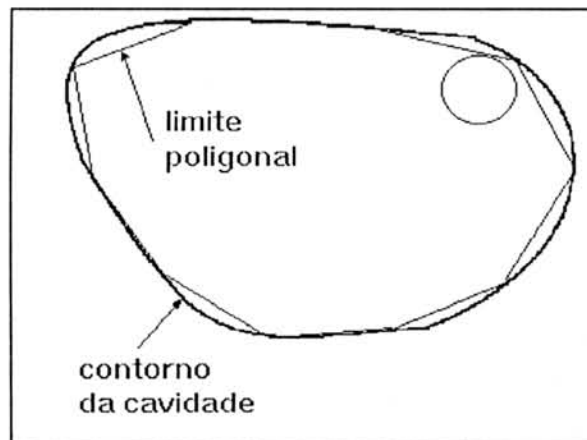
$$d = \frac{\textit{altura máxima} - \textit{altura mínima}}{n}$$

Para a determinação dos limites da superfície em cada plano de corte utiliza-se uma abordagem poliédrica, onde esta fronteira criada é formada por vários segmentos de reta.

#### 4.5.5.2 Usinagem dos Planos de Corte

Cada plano de corte tem seus limites, seja de cavidade ou de protrusão, e portanto a ferramenta usina o material até este contorno. O algoritmo analisa a superfície poliédrica e identifica se há uma cavidade ou uma protrusão para, desta forma, encaminhar a geração da trajetória da ferramenta neste plano.

No caso de cavidades, o *tool path* será interno ao contorno das mesmas, que, por serem em forma poliédrica, já oferecem segurança quanto aos limites, pois a abordagem em segmentos de reta torna a área a ser desbastada menor e, portanto, não há risco de remover material indevido, conforme a figura 4.13



**Figura 4.13** - Plano de Corte de uma Cavidade

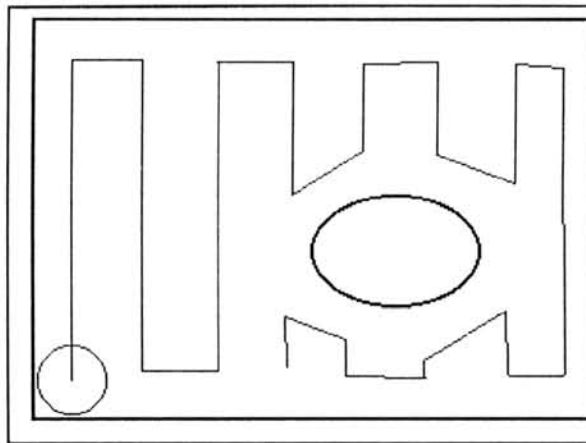
No caso de protrusões, a situação é diferente. Como a geração de um contorno poliédrico torna a área menor, ou seja, o polígono interno ao contorno da protrusão é menor que este, deve ser considerada uma distância entre a ferramenta e este contorno igual a maior dimensão que a ferramenta de acabamento pode remover. Desta forma, evita-se que seja retirado material indevido e não se prejudica a próxima etapa. A figura 4.14 esclarece esta observação.



**Figura 4.14** - Plano de Corte com Protrusão.

O *tool path*, para cada plano de corte é gerado em ziguezague. Considerando uma área a ser usinada onde a ferramenta se desloca em trajetórias paralelas, o espaçamento entre estas trajetórias deve ser igual para que o esforço sobre a ferramenta fique distribuído em todas as passadas.

Para reduzir as saídas e reentradas da ferramenta sobre a peça, o *tool path* gerado tem movimentos contínuos e, quando há uma protrusão obstruindo uma das trajetórias paralelas, a ferramenta é desviada para a seguinte, sendo que havendo material a retirar nesta trajetória, este ficará para um novo segmento de programa gerado logo após. A figura 4.15 mostra duas partes da trajetória da ferramenta obtidos em função do desvio da protrusão existente.



**Figura 4.15** - Dois Trechos da Movimentação da Ferramenta, Separados por Protrusão.

Posteriormente, para remover o restante do material não atingido pela operação anterior, utiliza-se um *tool path* em torno dos limites do relevo da peça neste plano. Também nesta operação deve ser observado que, no caso de protrusões, o limite poliédrico pode ser menor que o limite real da peça e, portanto, este deve ser acrescido de um valor igual a maior dimensão que a ferramenta de acabamento pode remover para evitar que se remova material indevido.

Nesta fase determina-se um contorno equidistante ao limite da superfície no plano de corte com o valor do raio da ferramenta de desbaste.

Para a determinação do contorno equidistante, as arestas são organizadas em seqüência, tal que o vértice final de uma é o vértice inicial da próxima. Desta forma, pode-se analisar o ângulo entre cada duas arestas e determinar as bissetrizes em cada vértice. Com o ângulo entre as arestas pode-se determinar a posição dos vértices no novo contorno.

Considerando  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  os ângulos de cada aresta, e  $\beta$  como o ângulo das bissetrizes, ou seja, o ângulo médio entre as duas arestas, temos:

$$\beta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} .$$

O valor  $h$  é a distância dos vértices nas bissetrizes, e é dado por

$$h = \frac{\text{raio da ferr.}}{\cos\left(90 - \frac{\beta}{2}\right)}$$

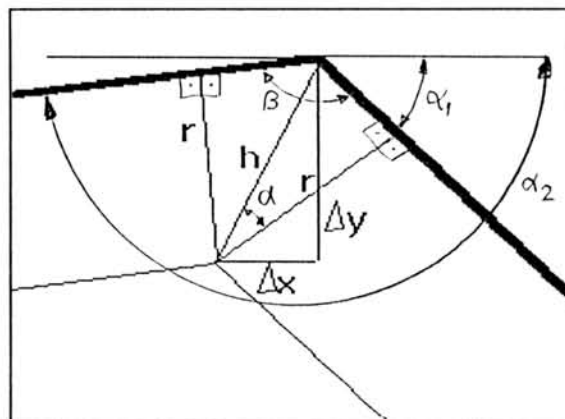
Logo, os valores  $\Delta x$  e  $\Delta z$  serão calculados por

$$\Delta x = h \cdot \cos\alpha \quad \text{e} \quad \Delta z = h \cdot \text{sen}\alpha,$$

sendo que

$$\alpha = 90 - \frac{\beta}{2}.$$

A figura 4.16 ilustra estas observações.



**Figura 4.16** - Determinação de contorno equidistante

Assim finaliza-se a etapa de desbaste, tendo a superfície um sobre-material menor que a maior dimensão que a ferramenta de acabamento pode remover.

#### 4.5.6 Etapa de Acabamento

Após a remoção do excesso de material na operação anterior, cabe à etapa de acabamento tornar a superfície da peça dentro das dimensões e forma desejadas. Para isso, usa-se nesta fase uma ferramenta rotativa de extremidade esférica, de modo a proporcionar a usinagem da superfície com uma geometria complexa.

Para a geração do *tool path* da etapa de acabamento, utiliza-se uma superfície poliédrica obtida na segunda poligonalização.

#### 4.5.6.1 Segunda Poligonalização

Para obter uma maior precisão no resultado final da usinagem, faz-se uma segunda poligonalização, destinada a geração do *tool path* de acabamento. Nesta operação, cria-se uma malha de 120 por 120 vértices através de intervalos isoparamétricos. Este valor, que é múltiplo do valor usado na primeira poligonalização, foi escolhido por triplicar o número de vértices em cada eixo e, com isso permitir que a geração da trajetória de acabamento seja mais precisa.

#### 4.5.6.2 Determinação do Espaçamento entre Trajetórias

A etapa de acabamento é realizada em ziguezague por toda a superfície. A geração das posições da ferramenta nesta operação é calculada partindo de pontos de contato da ferramenta com a superfície localizados em trajetórias paralelas ao plano  $yz$ . Para a determinação destas trajetórias utiliza-se uma abordagem poliédrica. Em função da inclinação desta superfície, tem-se um outro parâmetro a analisar, o ângulo  $\hat{A}$  desta inclinação. Este valor, tem uma influência na determinação da rugosidade  $r$  e do espaçamento  $e$  entre as trajetórias, como mostra a figura 4.17, para uma superfície plana.

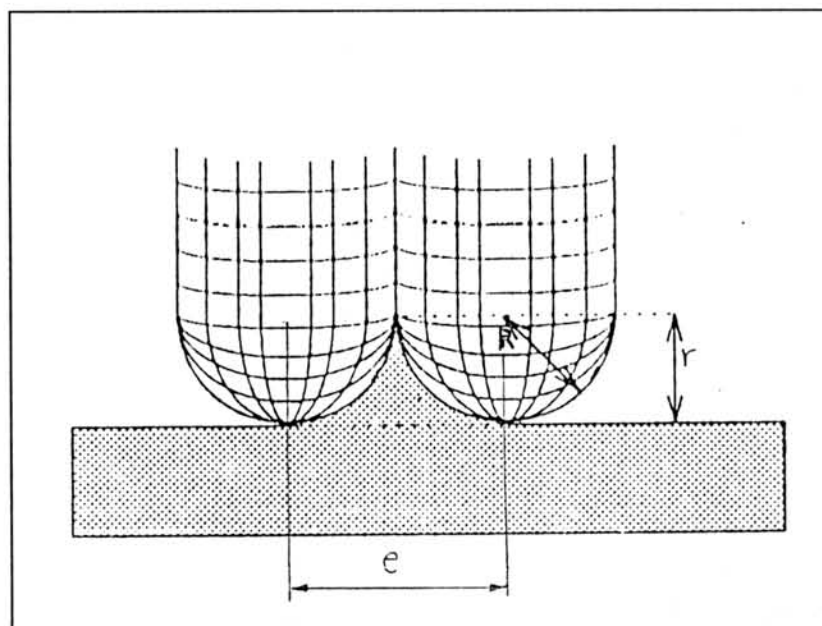
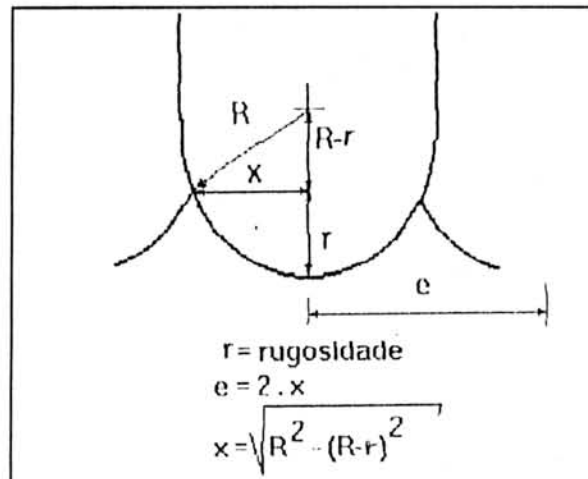


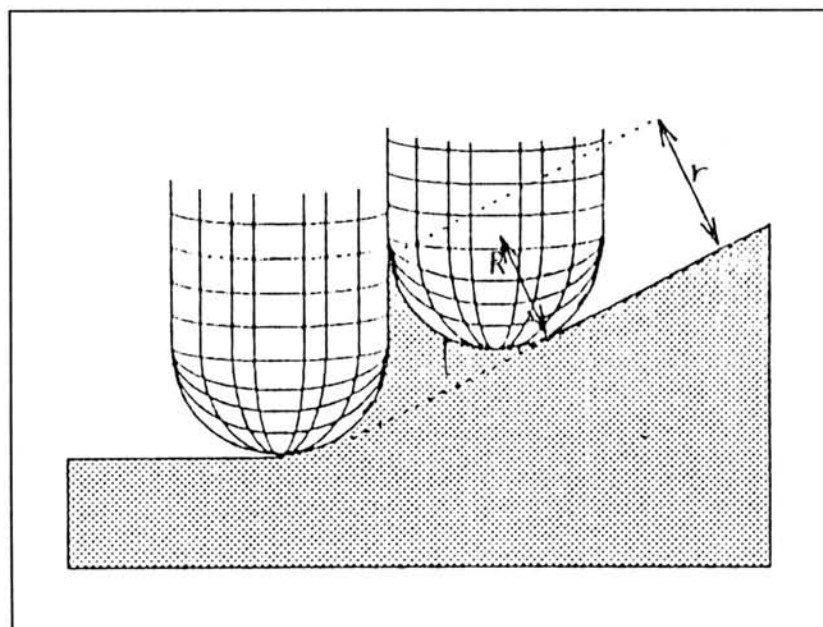
Figura 4.17 - Rugosidade [MAR94]

Desta forma, determina-se o espaçamento  $e$  entre cada movimento da ferramenta em função da máxima rugosidade  $r$  permitida. A figura 4.18 demonstra como pode ser obtido este espaçamento.

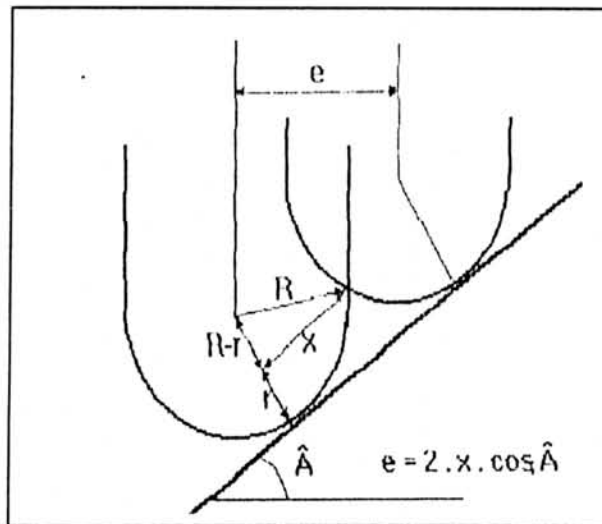


**Figura 4.18** - Cálculo do Espaçamento entre Trajetórias da Ferramenta na Etapa de Acabamento

No caso de superfícies inclinadas, como a situação da figura 4.19, o valor do ângulo da inclinação deve ser considerado neste cálculo, como mostra a figura 4.20.



**Figura 4.19** - Rugosidade com Inclinação [MAR94]



**Figura 4.20** - Cálculo do Espaçamento entre as Trajetórias para uma Superfície Inclinada

Como tem-se uma superfície de forma livre, as inclinações são comuns e, portanto, torna-se necessário determinar seus valores para decidir qual espaçamento usar nesta etapa. Com os valores das máximas inclinações para cada uma das dez regiões criadas, determina-se o espaçamento necessário em cada região. Com estes espaçamentos, determinam-se os pontos de contato da ferramenta com a superfície da peça.

#### 4.5.6.3 Determinação dos Pontos de Contato da Ferramenta (*CCDATA*)

Optou-se aqui, também por uma abordagem em ziguezague com trajetórias alternadas na direção do eixo  $z$ , sendo que o espaçamento dado em  $x$  entre cada movimento da ferramenta vai determinar a dimensão da rugosidade na superfície da peça. Nesta etapa a ferramenta percorre toda superfície da peça.

Com os valores dos espaçamento definidos, pode-se determinar os pontos de contato da ferramenta com a peça (*Cutter Contact - CCDATA*), que estarão em trajetórias paralelas ao plano  $yz$ . Tais pontos são obtidos pela interseção de cada trajetória paralela com as arestas da superfície poliédrica. Nestas posições é determinado também o vetor normal à superfície para ser usado na etapa posterior para a localização do centro da ferramenta. Para obter o vetor normal à superfície poliédrica, em cada face, deve-se realizar o produto vetorial do vetor criado pela interseção da trajetória paralela com a face, e um vetor igual a uma das arestas da face que foram interceptadas.

#### 4.5.6.4 Determinação das Posições das Ferramentas (*CLDATA*)

A posição do centro da ferramenta (*Cutter Location - CLDATA*) para usinar uma superfície deste tipo é determinada considerando-se o vetor normal à superfície.

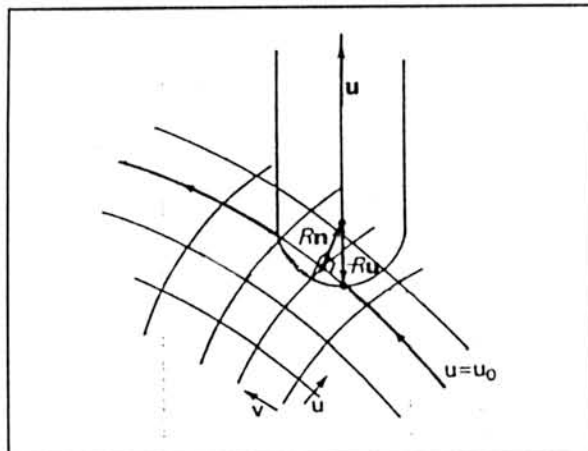
Como a extremidade desta ferramenta é semi-esférica, deve-se posicionar o centro desta esfera sobre este vetor normal a uma distância da peça igual ao raio da

ferramenta.

O vetor posição da ferramenta,  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u,v)$  é

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_c(u_0, v) = \mathbf{r}(u_0, v) + R(\mathbf{n} - \mathbf{u})$$

onde a primeira parcela refere-se ao ponto de contato, e a segunda, à distância do centro da ferramenta, conforme ilustra a figura 4.21 [FAU79].



**Figura 4.21** - Determinação da Posição da Ferramenta. [FAU79]

#### 4.6 Simulação e Verificação do Programa Gerado

Para a verificação do programa CNC gerado utilizou-se uma metodologia baseada nos trabalhos de Anderson [AND78] e de Marshall e Griffiths [MAR94]. Este método foi também usado por Oliveira e Camargo [OLI95] e consiste na criação de uma malha de topologia fixa. Todos os vértices tem as coordenadas  $x$  e  $z$  fixas, podendo variar a coordenada  $y$ .

Inicialmente esta malha apresenta todos os vértices com a mesma coordenada  $y$ , pois parte-se de um bloco de material em bruto sob a forma de um paralelepípedo. Obviamente, o material a ser usinado poderia ser pré-trabalhado ou mesmo proveniente de uma fundição ou de processo de conformação mecânica, com a forma muito próxima da final. Neste caso, poder-se-ia montar esta geometria para o início da simulação, mas esta situação não se caracteriza como a mais usual e portanto não foi considerada neste estudo.

O programa CNC é lido, linha por linha, e cada comando é executado, sendo que cada movimento de ferramenta, que pode ser linear ou em forma de arcos de circunferência, é representado sob a forma de envelope, ou seja, cria-se a representação da área ocupada pela extremidade da ferramenta em seu movimento. Esta área é a representação da superfície criada na peça pelo movimento da ferramenta e é obtida



graficamente através da verificação de todos os vértices contidos em seu interior que tem coordenadas  $y$  que extrapolam a posição desta superfície. Basicamente, é comparado o vértice da peça com um ponto de mesmas coordenadas  $x$  e  $z$  na superfície criada pelo movimento da ferramenta, sendo que a coordenada  $y$  da peça assume o valor da superfície se houver usinagem.

Como neste trabalho, as etapas de desbaste e acabamento tem uma forma específica, pode-se analisar a simulação gráfica separadamente. Para a operação de desbaste, tem-se movimento da ferramenta nos planos de corte, paralelos ao plano  $xz$ . Desta forma a coordenada  $y$  é sempre a altura do plano de corte considerado. Os movimentos da ferramenta são representados pelos envelopes mostrados na figura 4.22:

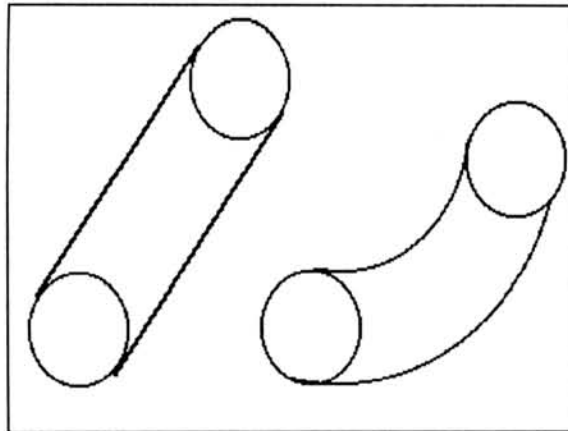


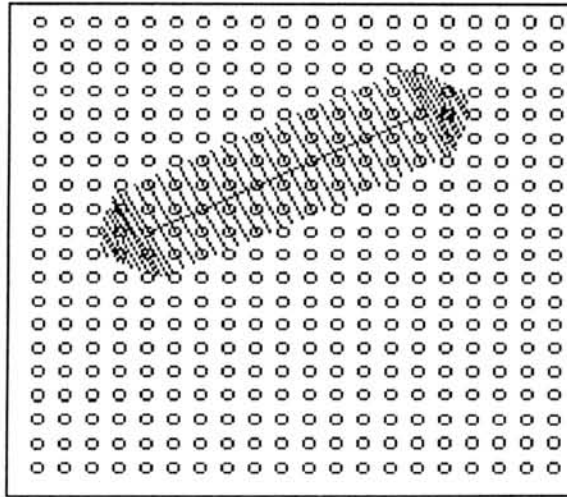
Figura 4.22 - Envelopes

Neste caso, verifica-se a usinagem com uma análise plana de cada envelope, realizada em todos os vértices da peça cobertos por esta área. Para isso, usam-se equações das retas e das circunferências na determinação dos vértices da peça que estão dentro do envelope que representa a área descrita pela movimentação da ferramenta. Faz-se então, uma análise considerando nas equações as variações de  $x$  e seu resultado em  $z$ , de modo a identificar quais os vértices devem ter a coordenada  $y$  alterada.

Na operação de acabamento são geradas trajetórias lineares. A simulação é realizada considerando um outro tipo de envelope criado pela ferramenta de extremidade esférica, composto por um quadrante de esfera em cada limite do movimento e um volume varrido por uma semicircunferência entre os dois limites do movimento, segundo a trajetória determinada, como mostra a figura 4.23.

A verificação se os vértices da malha são interceptados pela ferramenta é feita calculando para cada comando, que representa um movimento, o volume varrido pela ferramenta. Isto é feito testando as posições de retas perpendiculares ao movimento, no plano  $xz$ , que tem comprimento igual ao diâmetro da ferramenta, sendo centradas na linha do movimento da ferramenta. Por todo o comprimento destas retas, faz-se uma verificação da coordenada  $y$ , variando com o seno do ângulo da semicircunferência em cada ponto.

Deste modo, quando a reta cruzar a linha do movimento, o valor da coordenada  $y$  é igual ao valor da posição do centro do movimento menos o raio da ferramenta e, nos limites da reta, é igual ao da linha do movimento.



**Figura 4.23** - Envelope Gerado pela Ferramenta de Extremidade Esférica no plano  $xz$

Para as extremidades do movimento deve ser gerado o volume varrido correspondente a  $\frac{1}{4}$  de esfera. Para isto deve-se calcular as variações tanto da coordenada  $y$ , quanto dos comprimentos da reta perpendicular ao movimento da ferramenta (visto do plano  $xz$ ), que variam de 0, no limite extremo do envelope, até o valor do diâmetro da ferramenta, no ponto limite do movimento.

O método de simulação aqui adotado tem sua precisão vinculada à resolução utilizada na criação da malha, sendo importante considerar a complexidade da geometria da peça para a definição da resolução a ser adotada. Neste trabalho utilizou-se uma malha de  $150 \times 150$  que, no domínio de peças consideradas, significa que no pior caso tem-se um espaçamento de 2,66 mm entre os vértices. Este valor de resolução foi escolhido por ser o maior valor possível dentro da estrutura de dados do simulador. O aumento deste valor demanda a alteração de alguns procedimentos programados.

## 5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os passos que o sistema executa na geração de um segmento de programa CNC para usinar uma superfície livre. Três casos de geometrias complexas são mostrados, sendo um deles descrito em todas as suas etapas.

Para demonstrar a metodologia usada no sistema implementado, consideraram-se superfícies modeladas através da forma Bézier, com 16 pontos de controle.

### 5.1 Caso 1

O primeiro caso, que será descrito em todos os passos da geração do *tool path*, trata-se de uma superfície livre com uma cavidade e uma protrusão, conforme ilustra a figura 5.1.

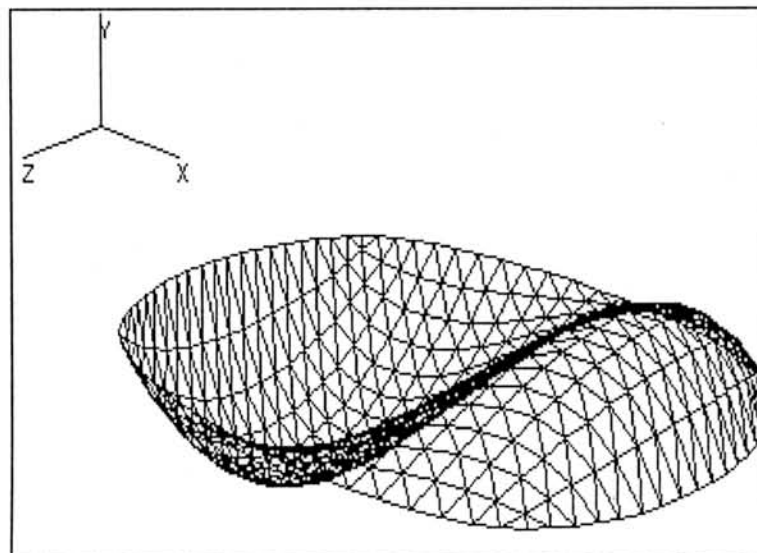


Figura 5.1 - Caso 1

Os pontos de controle são citados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Pontos de Controle

Ponto	X	Y	Z
1,1	-0,4	0	-0,4
1,2	-0,6	0	-0,2
1,3	-0,6	0	0,2
1,4	-0,4	0	0,4
2,1	-0,2	0	-0,6
2,2	-0,2	-1,5	-0,2
2,3	-0,2	-1,5	0,2
2,4	-0,2	0	0,6
3,1	0,6	0	-0,6
3,2	0,6	1,0	-0,2
3,3	0,6	1,0	0,2
3,4	0,6	0	0,6
4,1	0,8	0	-0,4
4,2	1,0	0	-0,2
4,3	1,0	0	0,2
4,4	0,8	0	0,4

Esta superfície apresenta 300 mm no eixo  $x$ , 220 mm no eixo  $z$  e 110,36 mm no eixo  $y$  entre o ponto mais alto e o mais baixo. Para usiná-la, utilizou-se um bloco em forma de paralelepípedo, com dimensões 310 mm x 230 mm x 230 mm, em  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente. O zero-peça é considerado no ponto zero do modelador.

Inicialmente, o sistema faz a seleção do diâmetro da ferramenta esférica a ser utilizada para usinar esta superfície. A seguir é feita a análise que identifica as concavidades e considera o raio de curvatura em cada vértice da superfície poliédrica.

Pela análise realizada, obteve-se um valor máximo para a ferramenta de extremidade esférica, usada no acabamento, de 66,1 mm. Sendo assim, foram escolhidas as ferramentas de extremidade cilíndrica com diâmetro de 40 mm para o desbaste e a ferramenta de extremidade semi-esférica com diâmetro de 32 mm para o acabamento. De acordo com o catálogo do fabricante [SAN91], a ferramenta de desbaste pode usinar até uma profundidade de 15 mm e a de acabamento até 16 mm.

### 5.1.1 Etapa de Desbaste

Em função das dimensões da superfície e as ferramentas escolhidas, foram criados sete planos de corte, como mostra a figura 5.2.

Para que os planos de corte fiquem igualmente espaçados em  $y$ , estes foram criados para os seguintes valores de  $y$ , apresentados na tabela 5.2.

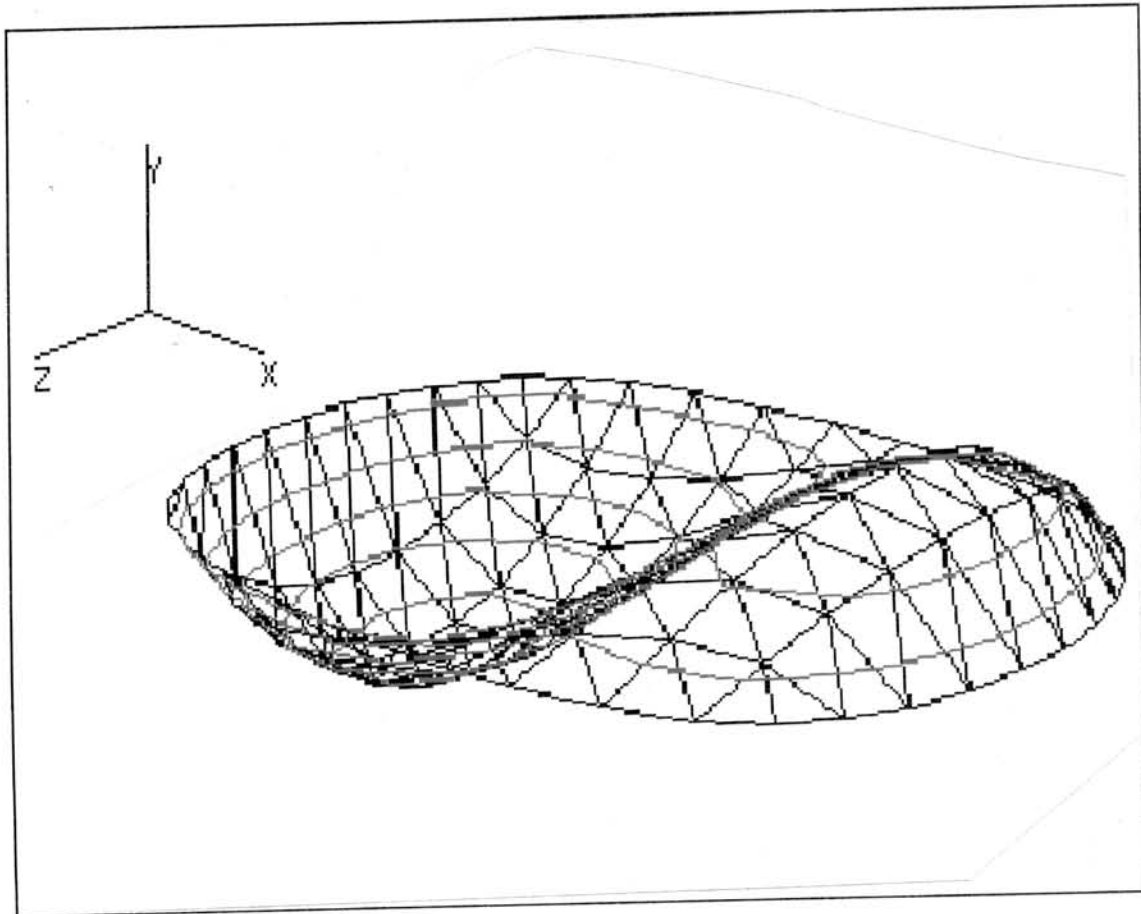


Figura 5.2 - Planos de Corte

Tabela 5.2 - Coordenada  $y$  dos Planos de Corte

Plano	$y$ (mm)
1	22,74
2	8,94
3	-4,86
4	-18,64
5	-32,44
6	-46,24
7	-60,04

Os planos são, então, tratados separadamente na operação de desbaste. Esta etapa gera um *tool path* em ziguezague sobre todo o plano considerado e posteriormente uma trajetória em torno do limite da peça com o plano, conforme ilustram as figuras 5.3 para uma protrusão e 5.4 para uma cavidade.

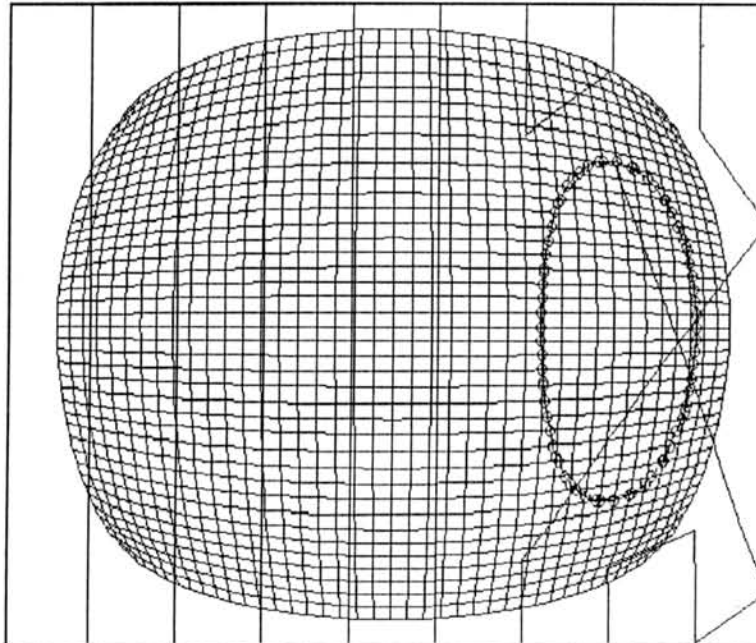


Figura 5.3 - *Tool Path* em cada Plano de Corte

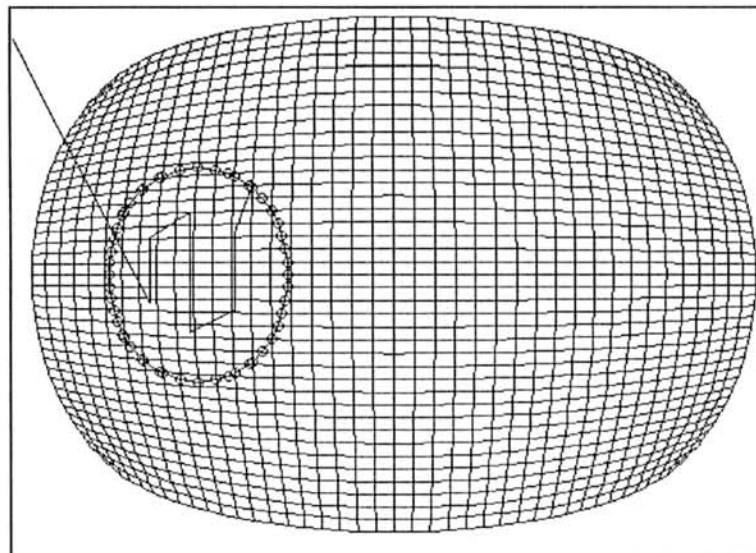


Figura 5.4 - *Tool Path* em Plano de Cavidade

### 5.1.2 Etapa de Acabamento

A etapa de acabamento é realizada com a ferramenta de extremidade esférica e, por isso, a primeira tarefa é determinar o espaçamento entre as trajetórias paralelas que serão criadas. Como tolerância para esta superfície foi escolhido um valor de 0,25 mm, ou seja, este é o valor da rugosidade considerado neste caso. Valores maiores ou menores poderão ser utilizados e terão, em função disso, maior ou menor número de comandos. De acordo com dez intervalos determinados segundo o eixo  $x$ , foram adotados dez valores de espaçamento entre as trajetórias. Os valores dos espaçamentos para cada intervalo, com a maior inclinação, são os mostrados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Dados do Espaçamento entre as Trajetórias

Interv.(mm)	Inclinação Máxima	Espaçamento(mm)
0 a 29,28	71,04°	1,83
29,28 a 58,32	49,86°	3,63
58,32 a 93,12	14,16°	5,46
93,12 a 121,68	32,21°	4,76
121,68 a 148,02	38,84°	4,39
148,02 a 178,4	39,60°	4,34
178,4 a 209,06	38,89°	4,38
209,06 a 237,68	32,11°	4,77
237,68 a 268,88	22,61°	5,20
268,88 a 300	55,73°	3,17

Com esses valores de espaçamento foram criadas 78 trajetórias paralelas ao plano  $yz$  que determinaram os pontos de contato da ferramenta. Caso fosse considerado o espaçamento igual em toda a superfície, a partir do valor máximo de inclinação, seriam necessárias 164 trajetórias.

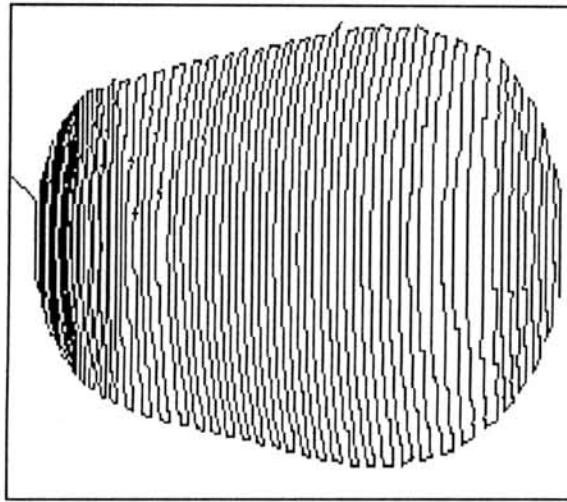
Como a superfície poliédrica tem uma malha 120 x 120, foram determinados 120 pontos de contato para cada trajetória. Em cada ponto foi calculado o vetor normal à superfície, usando para isso uma aresta da face e o segmento da trajetória criada que interceptou a face. Com o vetor normal é determinada a posição do centro da ferramenta. Desta forma tem-se um segmento de programa para usinar cada trajetória, que não é mais paralela ao plano  $yz$ , formado por 120 interpolações lineares.

### 5.1.3 Programa CNC Gerado

O programa gerado para usinar a superfície deste caso é bastante extenso. As seções anteriores ilustraram todos os passos desta operação. Por causa da extensão do referido programa, que consta de 724 comandos na etapa de desbaste e 9362 comandos na etapa de acabamento, encontra-se ao final do texto deste trabalho, no Anexo A-1, uma seleção de alguns comandos das duas etapas de usinagem para esta peça.

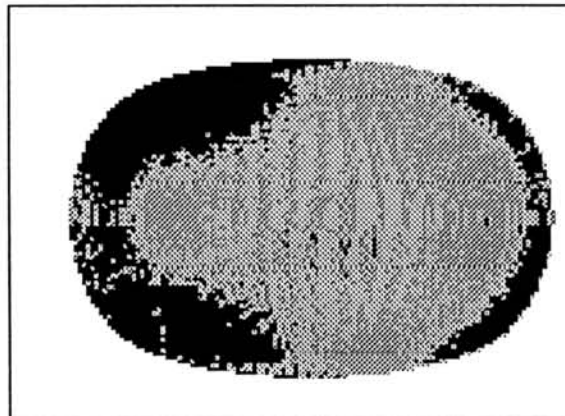
### 5.1.4 Validação:

A validação do programa gerado é feita através de simulação (ver ítem 4.6). Neste caso, dadas as dimensões da superfície, utilizou-se uma malha de 150 x 150 vértices no plano  $xz$ . A partir disso, cada linha de comando é lida e interpretada. Os movimentos da ferramenta formam envelopes que são, então, sobrepostos à malha e cada vértice tem sua coordenada  $y$  alterada de acordo com o envelope. A figura 5.5 mostra uma vista do plano  $xz$  do *tool path* de acabamento.



**Figura 5.5** - *Tool Path* de Acabamento

Ao final, a malha resultante foi comparada com a superfície paramétrica. Para isso, utilizou-se um intervalo paramétrico muito pequeno, de 0,001. Os valores de  $x$  e  $z$  calculados identificam o vértice da malha que deve ser comparado em sua coordenada  $y$ . Nesta operação, obteve-se um erro máximo (valor da malha - valor da superfície paramétrica) de 0,91 mm, conforme a figura 5.6, onde a cor clara indica erro entre 0 e 0,50 mm e a cor escura indica erro de 0,50 a 1,00 mm.

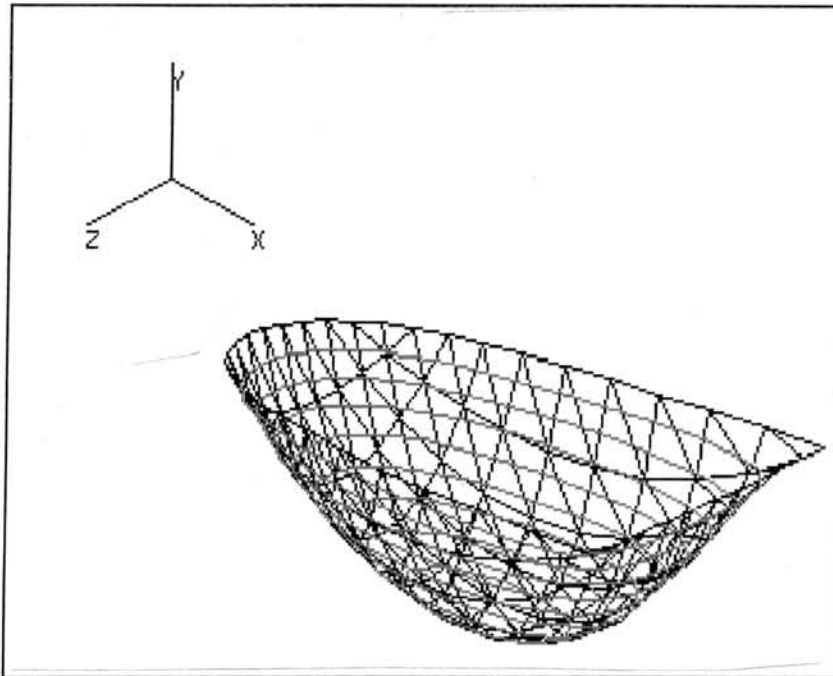


**Figura 5.6** - Comparação da Superfície Paramétrica com a Superfície Simulada

## 5.2 Caso 2

O segundo caso, que se caracteriza por uma superfície formada por uma cavidade, está ilustrado na figura 5.7.





**Figura 5.7 - Caso 2**

Esta peça apresenta as dimensões de 345 mm em  $x$ , 173,57 mm em  $z$  e uma profundidade em  $y$  de 118,67 mm, sendo usinada em um bloco de 410 x 200 x 210 mm<sup>3</sup>, em  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Na seleção da ferramenta obteve-se um valor limite para a ferramenta de acabamento de 106,05 mm, sendo selecionada a ferramenta de 32 mm de diâmetro. Para o desbaste foi selecionada a ferramenta de 40 mm, pois é a maior ferramenta de extremidade cilíndrica disponível.

Com as ferramentas selecionadas, foram criados 9 planos de corte, também mostrados na figura 5.7, para a etapa de desbaste, que totalizou 927 comandos.

Os planos de corte foram criados nos seguintes valores da coordenada  $y$ , listados na tabela 5.4.

**Tabela 5.4 - Coordenada  $y$  dos Planos de Corte**

Plano	$y$ (mm)
1	0
2	-13,18
3	-26,37
4	-39,55
5	-52,74
6	-65,93
7	-79,11
8	-92,29
9	-105,48

Já para a etapa de acabamento, foram determinadas 10 regiões com espaçamentos diferentes em função do ângulo de inclinação  $\hat{A}$ . A tabela 5.5 apresenta estes valores.

Tabela 5.5 - Dados do Espaçamento entre as Trajetórias

Interv.(mm)	Inclinação Máxima	Espaçamento(mm)
0 a 35,3	51,26°	3,53
35,3 a 67,3	44,81°	4,00
67,3 a 102,66	38,25°	4,42
93,12 a 121,68	29,56°	4,90
121,68 a 148,02	19,22°	5,32
148,02 a 178,4	10,10°	5,55
178,4 a 209,06	16,03°	5,42
209,06 a 237,68	32,46°	4,75
237,68 a 268,88	47,76°	3,79
268,88 a 300	63,47°	2,51

Com estes valores, obteve-se um *tool path* para acabamento com 82 trajetórias, sendo que considerando o valor de espaçamento para a maior inclinação esse número seria de 137 trajetórias.

Após a determinação dos pontos de contato e das posições da ferramenta, foram gerados 9840 comandos para esta etapa, mostrados na vista do plano *xz* na figura 5.8.

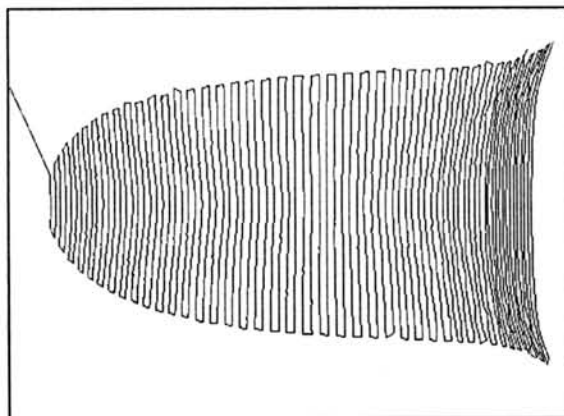
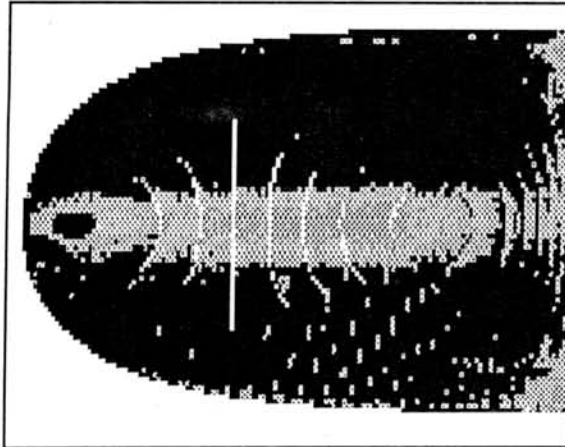


Figura 5.8 - *Tool Path* de Acabamento

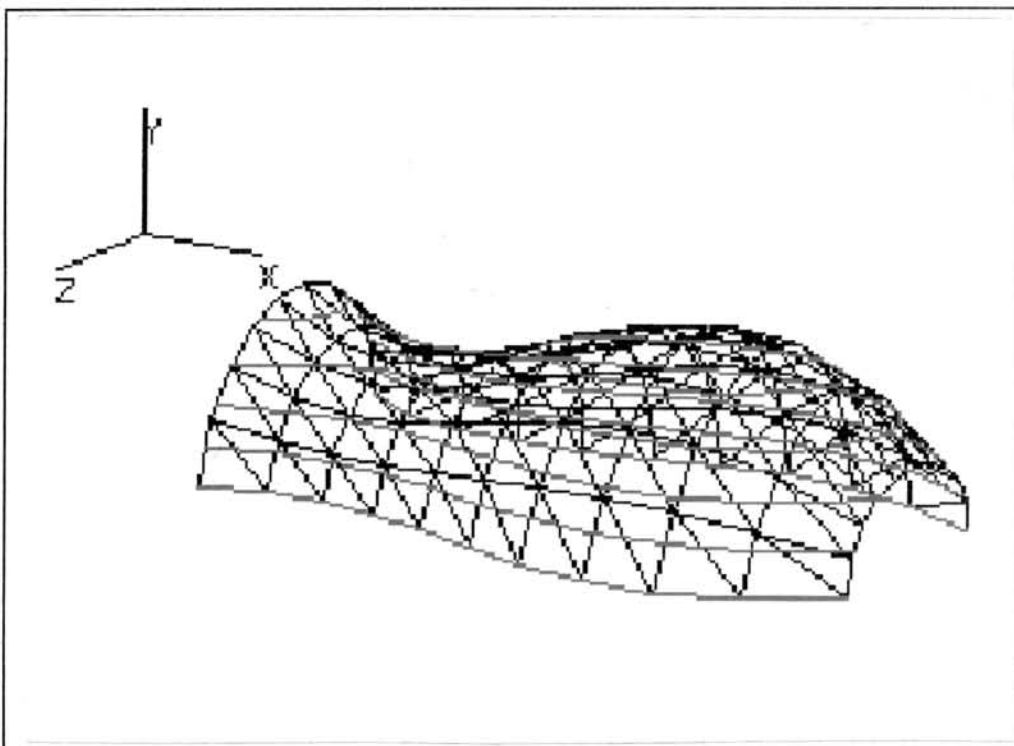
Na simulação, também usando uma malha de 150 x 150, obteve-se um erro máximo de 1,00 mm, sendo mostrado na figura 5.9, erro de 0 a 0,50 mm - representado pela cor clara e 0,50 a 1,00 mm - representado pela cor escura.



**Figura 5.9** - Comparação da Superfície Paramétrica com a Superfície Simulada

### 5.3 Caso 3

O terceiro caso, que caracteriza-se por uma superfície formada por uma protusão, esta ilustrado na figura 5.10.



**Figura 5.10** - Caso 3

Esta peça apresenta as dimensões de 280 mm em  $x$ , 152,04 mm em  $z$  e uma altura em  $y$  de 64,8 mm, sendo usinada em um bloco de 250 x 70 x 300. Na seleção da ferramenta selecionou-se a ferramenta de 32 mm de diâmetro por ser a maior disponível, já que por ser uma protrusão, não haverá remoção de material indevido com esta ferramenta. Para o desbaste foi selecionada a ferramenta de 40 mm, pois é a maior ferramenta de extremidade cilíndrica disponível.

Com as ferramentas selecionadas, foram criados 5 planos de corte, também mostrados na figura 5.10, para a etapa de desbaste, totalizando 559 comandos.

Os planos foram criados nos valores de  $y$ , listados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Coordenada  $y$  dos Planos de Corte

Plano	$y$ (mm)
1	51,84
2	38,88
3	25,92
4	12,96
5	0

Já para a etapa de acabamento, foram determinadas dez regiões com espaçamentos diferentes e, após a determinação dos pontos de contato e das posições da ferramenta, foram gerados 6345 comandos.

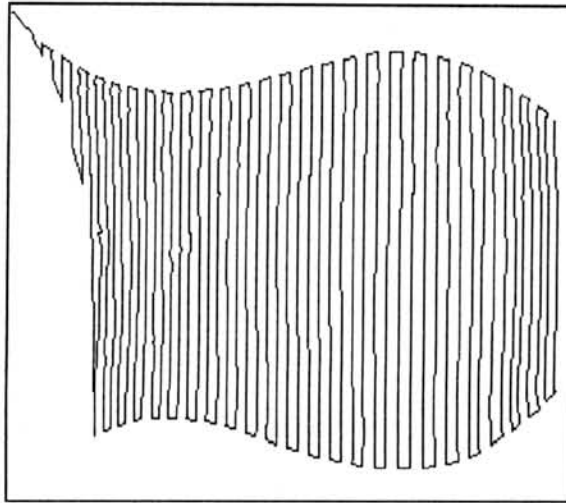
Os valores de espaçamento para as dez regiões são mostrados na tabela 5.7.

Tabela 5.7- Dados de Espaçamento das Trajetórias

Interv.(mm)	Inclinação Máxima	Espaçamento(mm)
0 a 26,55	19,63°	5,31
26,55 a 54,75	33,39°	4,70
54,75 a 85,59	24,12°	5,14
85,59 a 113,49	7,84°	5,58
113,49 a 140,64	15,22°	5,43
140,64 a 167,69	15,94°	5,41
167,69 a 194,94	14,48°	5,45
194,94 a 222,84	8,02°	5,58
222,84 a 253,2	25,98°	5,06
253,2 a 280	45,89°	3,92

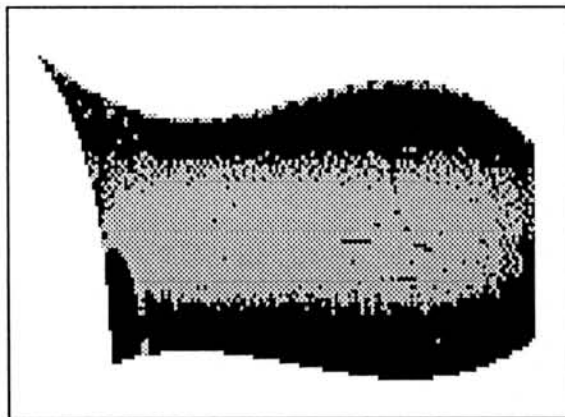
Com estes valores, obteve-se um *tool path* para acabamento com 55 trajetórias, sendo que considerando o valor de espaçamento para a maior inclinação esse número seria de 72 trajetórias.

Na simulação, também usando uma malha de 150 x 150, obteve-se um erro máximo de 0,89 mm, sendo que a trajetória de acabamento é mostrada na figura 5.11.



**Figura 5.11** - *Tool Path* de Acabamento

A figura 5.12 ilustra a simulação realizada, sendo que o erro está representado pela cor clara para valores de 0 a 0,50 mm e pela cor escura para valores de 0,50 a 1,00 mm.



**Figura 5.12** - Comparação da Superfície Paramétrica com a Superfície Simulada

## 6 Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho necessitam algumas considerações referentes à metodologia adotada e seu campo de ação.

O primeiro caso apresentado, formado por uma cavidade e uma protrusão, teve, para a etapa de desbaste, sete planos de corte. A usinagem destes planos somou 724 comandos de movimentação linear da ferramenta. A operação de acabamento teve um total de 9362 comandos, também de movimentação linear. Em função da divisão da superfície em 10 regiões, foram criadas 78 trajetórias paralelas ao plano  $yz$ , sendo que no pior caso, seriam 164 trajetórias. Na simulação obteve-se um erro máximo de 0,91 mm e, como pode ser visto na figura 5.6, as regiões mais escuras, que apresentaram maior erro, são as de maior inclinação da superfície.

O segundo caso, uma cavidade, teve, para a etapa de desbaste, nove planos de corte. A usinagem destes planos somou 927 comandos de movimentação linear da ferramenta. A operação de acabamento teve um total de 9840 comandos, também de movimentação linear. Em função da divisão da superfície em 10 regiões, foram criadas 82 trajetórias paralelas ao plano  $yz$ , sendo que no pior caso, seriam 137 trajetórias. Na simulação obteve-se um erro máximo de 1,00 mm e, como pode ser visto na figura 5.9, as regiões mais escuras, que apresentaram maior erro, são as de maior inclinação da superfície.

O terceiro caso, uma protrusão, teve, para a etapa de desbaste, cinco planos de corte. A usinagem destes planos somou 559 comandos de movimentação linear da ferramenta. A operação de acabamento teve um total de 6345 comandos, também de movimentação linear. Em função da divisão da superfície em 10 regiões, foram criadas 55 trajetórias paralelas ao plano  $yz$ , sendo que no pior caso, seriam 72 trajetórias. Na simulação obteve-se um erro máximo de 0,89 mm e, como pode ser visto na figura 5.12, as regiões mais escuras, que apresentaram maior erro, são as de maior inclinação da superfície.

A especificação de duas etapas de usinagem, desbaste e acabamento, serviu para restringir algumas variáveis deste trabalho. Consideraram-se, portanto, duas ferramentas distintas e, desta forma, seus parâmetros são analisados para cada etapa.

A realização do desbaste em planos de corte proporcionou maior rapidez a esta etapa e possibilitou o uso de ferramentas mais robustas, atuando de forma frontal ou tangencial. Esta estratégia demonstrou o quanto é possível ganhar em tempo, pois os movimentos lineares no plano e com distâncias maiores proporcionam melhor resultado que abordagens baseadas em movimentos equidistantes à superfície, que também tem, como agravante, maior custo computacional na sua determinação. Como as peças consideradas têm forma livre, o conceito de movimentos equidistantes à superfície aumentaria consideravelmente o número de movimentos, com deslocamentos bastante pequenos. Por isso o método dos planos de corte é a melhor escolha e foi adotada neste estudo.

No acabamento, uma consideração importante foi o uso de ferramenta de extremidade esférica. Autores como Catania [CAT92] e Zhu [ZHU91] criaram algoritmos para geração de trajetórias de ferramentas de extremidade cilíndrica usinando superfícies paramétricas. Sendo em máquinas de 3 eixos, as peças usinadas não terão um acabamento melhor que com o uso de ferramenta de extremidade esférica, como neste

trabalho.

A divisão da superfície em 10 regiões, também proporcionou considerável vantagem para efeito de determinação do espaçamento entre as trajetórias em zigzag, na operação de acabamento. Para os casos apresentados no capítulo anterior, esta medida proporcionou redução no número de trajetórias de 52 %, 40 % e 23 %, respectivamente para os três casos, o que é repassado de forma linear para o número de movimentos. Esta redução é percebida na memória consumida para armazenamento dos programas e no tempo de execução da usinagem, sem perder em qualidade de acabamento. Observa-se pelos valores diferenciados que o terceiro caso teve a menor redução do número de trajetórias. Isto se deve à geometria da peça, que apresenta, segundo o eixo  $x$ , menores variações de inclinação que os casos anteriores. Conclui-se, portanto, que quanto maiores as variações de inclinação para as regiões analisadas, maior será a redução no número de trajetórias paralelas consideradas na etapa de acabamento. A utilização de outro número de regiões poderá trazer melhores resultados dependendo da geometria da peça analisada. O aumento do número de regiões tende a melhorar a capacidade de redução das trajetórias por este método. Deste modo, possibilitará que situações de maior inclinação em pequena extensão sejam consideradas em menores regiões, havendo então, uma melhor distribuição dos valores.

O aumento do valor da rugosidade tolerada  $r$  promove um aumento no espaçamento entre as trajetórias paralelas ao plano  $yz$  e, por isso, reduz o número de comandos da etapa de acabamento. Entretanto, este aumento de tolerância proporciona uma superfície de menor precisão.

Com relação à necessidade de redução do tamanho dos programas e sua otimização, observa-se que muitas medidas podem ser aplicadas. Pode-se suprimir movimentos muito curtos, adotando um padrão mínimo, talvez vinculado ao diâmetro da ferramenta; pode-se trocar alguns movimentos lineares por uma combinação de movimentos lineares e circulares observando condições de continuidade, conforme já mostraram alguns autores [MEE92] [VIC92]; pode-se minimizar tempo não produtivo, ou seja, tempo de movimentação sem usinar e finalmente pode-se explorar o uso de seleção otimizada de ferramentas, providência já testada em alguns tipos de cavidades [COT95]. No sistema aqui implementado, verificam-se duas situações que podem trazer bom resultados para uma otimização inicial. A primeira refere-se à etapa de desbaste, quando da usinagem em trajetória equidistante ao contorno, seja de cavidade ou protrusão. Como a superfície poliédrica tem malha 40 por 40, os polígonos criados na geração do plano de corte, apresentam um número grande de arestas. Este valor poderia ser reduzido pois a etapa posterior, de acabamento, remove o sobrematerial existente. A segunda situação refere-se à etapa de acabamento, que tem em cada trajetória paralela ao plano  $yz$ , a determinação de 120 pontos, para a posterior determinação da posição da ferramenta. Para determinadas inclinações da superfície, esta resolução pode ser pequena, mas para outras, este número fixo de pontos pode ser excessivo em algumas regiões. Deve-se, portanto, adotar um procedimento que distribua estes pontos em função da inclinação da superfície na direção do eixo  $z$ , providência já adotada quanto ao eixo  $x$ .

Devido às dificuldades de acesso deste autor a uma máquina-ferramenta com CNC em três eixos para a realização dos testes para validação do trabalho, optou-se pelo uso de simulação. Este método mostrou-se satisfatório quanto ao aspecto geométrico, que é o considerado neste estudo.

O uso de simulação de programas CNC é um meio mais prático, rápido e econômico de verificação, sendo tarefa fundamental para a confirmação dos dados programados.

Observa-se que vários métodos de verificação são utilizados e têm como características marcantes o seu custo computacional, ou seja, uns exigem mais processamento que outros e por isso necessitam de computadores mais velozes e/ou mais memória. Certamente, estes apresentam uma maior precisão na verificação.

O método aqui executado permitiu que se verificasse a movimentação da ferramenta de modo a validar os programas criados. Por se tratar de um sistema coadjuvante, sua implementação se restringiu aos aspectos necessários.

Quanto aos valores de erro obtidos nas geometrias simuladas, observa-se que está diretamente vinculado à resolução adotada tanto no sistema de geração de trajetórias de ferramenta, quanto no simulador. Este erro, para as dimensões de peça e ferramenta, pode ser considerado pequeno e poderá ser reduzido, visto que seu valor foi obtido analisando uma superfície paramétrica, com intervalos paramétricos de 0,001 e uma superfície obtida por simulação com uma malha de 150 x 150. Além disso, o *tool path* de acabamento, foi gerado de uma malha de 120 x 120. Esta discretização da superfície conduziu aos resultados encontrados, pois os vértices das superfícies poliédricas criadas pelo sistema de geração de trajetórias e pelo simulador não são coincidentes. Outro aspecto é que em condições de usinagem, erros desta grandeza poderão acontecer devido ao aquecimento da zona de usinagem. Entretanto, percebe-se que com o aumento da resolução estes valores tendem a diminuir. Em sistemas como o CASCAM [LEE91] houve um erro de 2,54 mm minimizado a 0,25 mm com um aumento de cerca de quatro vezes na resolução para a etapa de acabamento. Hwang [HWA92] obteve um erro de 0,01 mm em superfícies de 1430 x 1190 mm com o uso de 285.340 pontos. Certamente é um resultado que não pode ser obtido em um microcomputador pois o custo computacional é excessivo e inadequado para esta máquina.



## 7 Conclusão

O objetivo deste estudo foi o desenvolvimento e a implementação de um sistema de geração de programas CNC. Nesta tarefa consideraram-se diversas alternativas citadas na literatura técnica e destas foi selecionada a estratégia aqui adotada.

Considerando o domínio de peças selecionado e as possibilidades de uma máquina-ferramenta de 3 eixos, verificou-se que a metodologia de realizar uma etapa de desbaste em planos de corte é a melhor escolha, visto que pode ser usada tanto no interior das cavidades quanto externamente às protruções, sempre retirando grande quantidade de material. Por outro lado, este tipo de usinagem causa um esforço aproximadamente constante na ferramenta, o que pode ser melhor.

Quanto à etapa de acabamento, considerou-se que o uso de uma ferramenta de extremidade esférica, trabalhando em ziguezague por toda a superfície da peça, é a melhor alternativa, pois contempla a geometria da superfície de forma livre e oferece condições de obtenção do resultado desejado.

Embora não tenha sido realizado um teste em uma máquina-ferramenta, pode-se observar, através da simulação, que este sistema atingiu aos objetivos propostos. Certamente em situação real, na máquina, estes valores poderão ser diferentes devido a fatores não considerados aqui, como aquecimento da zona de contato entre ferramenta e peça, remoção de cavacos, condições de usinagem não otimizadas, materiais de peça e ferramenta, entre outros fatores.

### 7.1 Aplicabilidade e Custo Computacional

O desenvolvimento deste estudo possibilitou a aplicação de diversas técnicas de Computação Gráfica para resolver um problema de Engenharia, mais especificamente de fabricação. Estas técnicas foram implementadas para a criação de um sistema protótipo, mas muitas otimizações são possíveis para sua melhor utilização e apresentação.

Mesmo sendo executado em microcomputador PC AT 486, o que para a realidade atual já é um equipamento defasado e lento, o sistema permitiu a geração de segmentos de programas de mais de 10000 linhas em menos de dois minutos. Certamente com o uso de máquinas mais velozes e com o uso de algoritmos mais rápidos, este tempo deve ser reduzido.

Com relação à aplicabilidade da proposta apresentada, observou-se que atende às necessidades de um grande número de situações. A necessidade de reduzir o custo computacional para dar mais agilidade ao sistema fez com que os resultados não fossem exatamente os esperados. Mesmo assim, esta diferença, conforme já comentado no capítulo anterior pode ser reduzida com o aumento da resolução da superfície poliédrica. Vale neste caso, a relação custo-benefício de quanto este aumento de resolução vai aumentar o custo computacional. Entretanto, esta consideração não foi testada visto que o resultado obtido atende a um grande número de situações.

Conclui-se, portanto, que a metodologia adotada é aplicável ao domínio de peças proposto, pois realiza a geração de trajetórias de ferramentas para usinagem de

peças de geometria bastante complexa. Além disso, proporciona várias possibilidades de otimização, como a troca de alguns comandos lineares por combinações de comandos lineares e circulares, o que nas pesquisas divulgadas trouxe grande benefício.

O sistema implementado encontra-se disponível nesta Instituição de Ensino, sendo sua utilização indicada para fins científicos e educacionais.

## **7.2 Objetivos Futuros**

A realização deste estudo proporcionou não só o conhecimento de uma área explorada há vários anos, com inúmeras investigações já documentadas, mas também apresentou uma série de caminhos para a pesquisa nesta mesma linha. O espectro de opções é bastante grande, seja para a geração de programas em peças com outras geometrias, seja considerando ilhas nas cavidades ou ainda explorando recursos em máquinas com mais de três eixos que permitem outros tipos de planos de fabricação e maior versatilidade. Pode-se aprofundar o estudo a respeito de reconhecimento de forma e sua utilização na geração do plano de fabricação ou mesmo implementar outros métodos de simulação buscando um resultado mais próximo do real, com a inclusão de condições de usinagem.

## Anexo A-1

### Seleção de Segmentos de Programa para as Etapas de Desbaste e Acabamento

\* Programa: pecatese.cnc

\*

\*\*\*\*\* Etapa de Desbaste

g00 x-096000 y50000 z-136000  
 g01 x-096000 y22740 z-136000 f50  
 g01 x-096000 y22740 z0096000 f50  
 g01 x-057250 y22740 z0096000 f50  
 g01 x-057250 y22740 z-096000 f50  
 g01 x-018500 y22740 z-096000 f50  
 g01 x-018500 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0020250 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0020250 y22740 z-096000 f50  
 g01 x0059000 y22740 z-096000 f50  
 g01 x0059000 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0097750 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0097750 y22740 z0058642 f50  
 g01 x0097750 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0136500 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0136500 y22740 z0082085 f50  
 g01 x0136500 y22740 z0096000 f50  
 g01 x0175250 y22740 z0068211 f50  
 g01 x0175250 y22740 z0096000 f50

\* Etapa de Acabamento

g01 x -98197 y 3466 z-20527 f20  
 g01 x -98161 y 171 z-12336 f20  
 g01 x -98124 y -948 z -8191 f20  
 g01 x -98098 y -1629 z -4016 f20  
 g01 x -98084 y -1860 z 173 f20  
 g01 x -98083 y -1637 z 4362 f20  
 g01 x -98094 y -965 z 8536 f20  
 g01 x -98117 y 144 z 12680 f20  
 g01 x -98152 y 1673 z 16780 f20  
 g01 x -98197 y 3466 z 20527 f20  
 g01 x -96500 y 3474 z 28795 f20  
 g01 x -96431 y 827 z 24962 f20  
 g01 x -96373 y -1536 z 20970 f20  
 g01 x -96325 y -3528 z 16900 f20  
 g01 x -96289 y -5112 z 12770 f20  
 g01 x -96265 y -6262 z 8597 f20  
 g01 x -96253 y -6957 z 4394 f20  
 g01 x -96254 y -7187 z 177 f20  
 g01 x -96269 y -6949 z -4039 f20  
 g01 x -96295 y -6245 z -8242 f20  
 g01 x -96335 y -5087 z-12417 f20  
 g01 x -96386 y -3494 z-16547 f20  
 g01 x -96450 y -1492 z-20619 f20  
 g01 x -96500 y 3474 z-28795 f20  
 g01 x -94859 y 3488 z-34739 f20  
 g01 x -94794 y -1347 z-28726 f20  
 g01 x -94706 y -4157 z-24789 f20  
 g01 x -94628 y -6622 z-20761 f20  
 g01 x -94562 y -8696 z-16658 f20  
 g01 x -94508 y-10345 z-12497 f20  
 g01 x -94467 y-11542 z -8294 f20  
 g01 x -94439 y-12253 z -4163 f20  
 g01 x -94693 y-11589 z -4158 f20  
 g01 x -94683 y-11800 z 184 f20  
 g01 x -94693 y-11589 z 4158 f20  
 g01 x -94681 y-11600 z 4425 f20  
 g01 x -94439 y-11547 z 8656 f20  
 g01 x -94461 y-10369 z 12861 f20  
 g01 x -94498 y -8729 z 17020 f20  
 g01 x -94548 y -6664 z 21122 f20  
 g01 x -94610 y -4210 z 25148 f20  
 g01 x -94682 y -1412 z 29081 f20  
 g01 x -94763 y 1672 z 32900 f20  
 g01 x -94859 y 3488 z 34739 f20  
 g01 x -93146 y 3496 z 39959 f20  
 g01 x -93043 y 329 z 36885 f20  
 g01 x -92949 y -3124 z 33161 f20  
 g01 x -92864 y -6338 z 29304 f20  
 g01 x -92806 y -9207 z 25317 f20  
 g01 x -93061 y-10550 z 21852 f20  
 g01 x -92989 y-11026 z 21256 f20

g01 x -92934 y-12835 z 17120 f20  
 g01 x -92892 y-14271 z 12932 f20  
 g01 x -92864 y-15311 z 8705 f20  
 g01 x -92851 y-15939 z 4453 f20  
 g01 x -92853 y-16146 z 189 f20  
 g01 x -92870 y-15929 z -4076 f20  
 g01 x -92901 y-15291 z -8328 f20  
 g01 x -92948 y-14241 z-12555 f20  
 g01 x -93009 y-12794 z-16745 f20  
 g01 x -93061 y-10550 z-21852 f20  
 g01 x -92806 y-11192 z-21870 f20  
 g01 x -92888 y -9197 z-24965 f20  
 g01 x -92980 y -6277 z-28937 f20  
 g01 x -93083 y -3049 z-32798 f20  
 g01 x -93146 y 3496 z-39959 f20  
 g01 x -91601 y 3515 z-44025 f20  
 g01 x -91515 y -424 z-40441 f20  
 g01 x -91390 y -4228 z-36821 f20  
 g01 x -91274 y -7850 z-33050 f20  
 g01 x -91163 y-10138 z-30500 f20  
 g01 x -91424 y -9505 z-30476 f20  
 g01 x -91355 y-12902 z-25100 f20  
 g01 x -91263 y-15147 z-21001 f20  
 g01 x -91185 y-17032 z-16837 f20  
 g01 x -91122 y-18526 z-12623 f20  
 g01 x -91073 y-19610 z -8371 f20  
 g01 x -91040 y-20268 z -4095 f20  
 g01 x -91023 y-20492 z 194 f20  
 g01 x -91021 y-20278 z 4482 f20  
 g01 x -91035 y-19629 z 8758 f20  
 g01 x -91063 y-18555 z 13009 f20  
 g01 x -91107 y-17071 z 17223 f20  
 g01 x -91165 y-15199 z 21386 f20  
 g01 x -91237 y-12966 z 25483 f20  
 g01 x -91321 y-10412 z 29499 f20  
 g01 x -91424 y -9505 z 30476 f20  
 g01 x -91163 y -7864 z 33395 f20  
 g01 x -91234 y -4313 z 37191 f20  
 g01 x -91340 y -530 z 40801 f20  
 g01 x -91601 y 3515 z 44025 f20  
 g01 x -91451 y 3330 z 44229 f20  
 g01 x -89775 y 3119 z 47900 f20  
 g01 x -89941 y 3526 z 47866 f20  
 g01 x -89654 y -929 z 44633 f20  
 g01 x -89536 y -4994 z 41156 f20  
 g01 x -89452 y -8886 z 37493 f20  
 g01 x -89716 y -8462 z 37236 f20  
 g01 x -89604 y-11469 z 33638 f20  
 g01 x -89504 y-14412 z 29688 f20  
 g01 x -89416 y-17061 z 25642 f20  
 g01 x -89341 y-19372 z 21516 f20  
 g01 x -89281 y-21307 z 17327 f20  
 g01 x -89235 y-22840 z 13087 f20  
 g01 x -89205 y-23948 z 8811 f20  
 g01 x -89191 y-24617 z 4510 f20  
 g01 x -89193 y-24838 z 198 f20  
 g01 x -89211 y-24608 z -4114 f20  
 g01 x -89245 y-23930 z -8414 f20  
 g01 x -88215 y -762 z-47997 f20  
 g01 x -88065 y -5078 z-44661 f20  
 g01 x -87913 y -8037 z-42323 f20

## Bibliografía Referenciada

- [AFI95] AFIFI, A. A.; HAYHURST, D. R. Computer-aided part program optimization of multi-component pallet residence time in a machining centre for canned cycles and cutter tool compensation. **Int. J. Computer Integrated Manufacturing**, v. 8, n. 1, p. 1-20, Jan. 1995.
- [AND78] ANDERSON, R. O. Detecting and eliminating collisions in NC machining. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 10, n. 4, p. 231-238, July 1978.
- [BED87] BEDI, S.; VICKERS, G. W. Postprocessor for NC machine tools. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 15, p. 3-18, 1987.
- [BID96] BIDANDA, B.; BILLO, R. E. Parametric design and NC code generation of countersink cutting tools. **Int. J. Computer Integrated Manufacturing**, v. 9, n. 2, p. 105-112, Feb. 1996.
- [BOB85] BOBROW, J. E. NC machine tool path generation from CSG part representation. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 17, n. 2, p. 69-76, Mar. 1985.
- [CAT92] CATANIA, G. A computer-aided prototype system for NC rough milling of free-form shaped mechanical part-pieces. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 20, n. 3, p. 275-293, Oct. 1992.
- [CHO84] CHOI, B. K.; BARASH, M. M.; ANDERSON, D. C. Automatic recognition of machined surfaces from a 3D solid model. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 16, n. 2, p. 81-86, Mar. 1984.
- [CHO88] CHOI, B. K. *et al.* Compound surface modeling and machining. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 20, n. 3, p. 127-136, Apr. 1988.
- [CHO89] CHOI, B. K. Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 6 p. 371-378, July/Aug. 1989.
- [CHU90] CHUANG, S. H.; HENDERSON, M. R. Three-dimensional shape pattern recognition using vertex classification and vertex-edge graphs. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 22, n. 6, p. 377-387, July 1990.
- [COR91] CORNEY, J.; CLARK, D. E. R. Method for finding holes and pockets that connect multiple faces in 2½-D objects. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 23, n. 10, p. 658-668, Dec. 1991.

- [COT93] COTA, F. E.; QUEIROZ, A. A.; GONÇALVES FILHO, E. Usinagens de cavidades em formas arbitrárias em máquinas-ferramentas de comando numérico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 12., 1993, Brasília. **Anais...** Brasília: ABCM, 1993. p. 1599-1602.
- [COT95] COTA, F. E.; GONÇALVES FILHO, E. V. Otimização de cavidades em formas "arbitrárias". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 13., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABCM, 1995.
- [COX94] COX, J. J. *et al.* Space-filling curves in tool-path applications. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 3, p. 215-224, Mar. 1994.
- [CRE73] CREMERIUS, J. APT/IGS: State of the art in NC graphics. In: COMPUTER LANGUAGES FOR NUMERICAL CONTROL, 1973, Budapest. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1973. p. 87-107.
- [CRE73] CRESTIN, J. P.; PAILLARD, J. P. A small graphical system for programming NC machines. In: COMPUTER LANGUAGES FOR NUMERICAL CONTROL, 1973, Budapest. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1973. p. 63-70.
- [DAV73] DAVIES, K. J. GNC - A graphical NC processor. In: COMPUTER LANGUAGES FOR NUMERICAL CONTROL, 1973, Budapest. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1973. p. 51-61.
- [ELB94] ELBER, G.; COHEN, E. Tool path generation for freeform surface models. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 6, p. 490-496, June 1994.
- [FAU79] FAUX, I. D.; PRATT, M. **Computational Geometry for Design and Manufacture**. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1979. 331 p.
- [FER84] FERREIRA, A. C. **Introdução ao Comando Numérico**. Florianópolis: PGEM da UFSC, 1984. 224 p.
- [FER90] FERREIRA, J. C. E.; HINDUJA, S. Convex hull-based feature-recognition method for 2.5D components. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 22, n. 1, p. 41-49, Jan. 1990.
- [FER93] FERREIRA, J. C. E. An algorithm for generating the tool paths for machining complex 2 ½-D components. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 12., 1993, Brasília. **Anais...** Brasília: ABCM, 1993. p. 1587-1590

- [FER77] FERRARESI, D. **Fundamentos de Usinagens dos Metais**. São Paulo: E. Blücher, 1977. 500 p.
- [FIE94] FIELDS, M. C.; ANDERSON, D. C. Fast feature extraction for machining applications. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 11, p. 803-813, Nov. 1994.
- [FLO89] DE FLORIANI, L.; BRUZZONE, E. Building a feature-based object description from a boundary model. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 10, p. 602-610, Dec. 1989.
- [FOL90] FOLEY, J.D. *et al.* **Computer Graphics: Principles and Practice**. New York: Addison-Wesley, 1990. 1174 p.
- [GAR93] GARDAN, Y.; MINICH, C. Feature-based models for CAD/CAM and their limits. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 3-13, Nov. 1993.
- [GRI94] GRIFFITHS, J. G. Toolpath based on Hilbert's curve. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 11, p. 839-844, Nov. 1994.
- [GRO84] GROOVER, M.; ZIMMERS, E. W. **CAD/CAM - Computer-Aided Design and Manufacturing**. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1985. 489 p.
- [GUY90] GUYDER, M. K. Automating the optimization of 2 ½ axis milling. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 15, p. 163-168, 1990.
- [HAN92] HANSEN, A.; ARBAB, F. An algorithm for generating NC tool paths for arbitrarily shaped pockets with islands. **ACM Transactions on Graphics**, New York, v. 11, n. 2, p. 152-182, Apr. 1992.
- [HEL94] HELD, M.; LUKÁCS, G.; ANDOR, L. Pocket machining base on contour-parallel tool paths generated by means of proximity maps. **Computer-Aided Design**, v. 26, n. 3, p.189-203, Mar. 1994.
- [HIR73] HIRANO, T.; KIRA, M. Application of graphic NC gas cutting system (GGCS) with minicomputer in shipbuilding. In: **COMPUTER LANGUAGES FOR NUMERICAL CONTROL**, 1973, Budapest. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1973. p. 493-500.
- [HSU93] HSU, P-L. Real-time 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 25, n.4, p. 215-224, Apr. 1993.
- [HWA92] HWANG, J.S. Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces. **Computer-Aided Design**, Surrey,

England, v. 24, n. 12, p. 667-676, Dec. 1992.

- [INS91] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE ORGANISATIONSFORSCHUNG.  
**Comando Numérico CNC - Técnica Operacional - Fresagem.** São Paulo: EPU - Editora Pedagógica e Universitária Ltda., 1991.
- [JOS88] JOSHI, S.; CHANG, T-C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 20, n. 2, p. 58-66, Mar. 1988.
- [KHA91] KHAN, W. A.; HAYHURST, D.R. Computer-aided part program segmentation and reconstruction for minimization of machine tool residence time. **Int. J. Computer Integrated Manufacturing**, v. 4, n.5, p. 300-314, May 1991.
- [LAF77] LAFFRET, D.; BEZACIER, P., D'OLIVEIRA, J. L. ELAN: A conversational processor for generation, checking and correction of NC tapes. In: **ADVANCES IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURE, 1976**, Stirling. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1977. p. 43-51.
- [LEE87] LEE, Y. C.; FU, K. S. Machine understanding of CSG: extraction and unification of manufacturing features. **IEEE Computer Graphics & Applications**, New York, v. 7, n. 1, p. 20-32, Jan. 1987.
- [LEE91] LEE, Y-S.; CHANG, T-C. CASCAM - An automated system for sculptured surface cavity machining. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 16, p. 321-342, 1991.
- [LEE94] LEE, K.; KIM, T. J.; HONG, S. E. Generation of toolpath with selection of proper tools for rough cutting process. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 11, p. 822-831, Nov. 1994.
- [LEU77] LEUS, V. A.; ZAVYALOV, Y. S.; YARACHMEDOVA, S. D. FRANS Program for a machining centre. In: **ADVANCES IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURE, 1976**, Stirling. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1977. p. 73-79.
- [LI94] LI, H.; DONG, Z.; VICKERS, G. W. Optimal toolpath pattern identification for single island, sculptured part rough machining using fuzzy pattern analysis. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 11, p. 787-795, Nov. 1994.
- [LON87] LONEY, G.C.; OZSOY, T.M. NC machining of free form surfaces. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 19, n. 2, p. 85-90, Mar. 1987.

- [MAC87] MACHADO, A. **Comando Numérico Aplicado à Máquinas-Ferramentas**. São Paulo: Ícone, 1987. 396 p.
- [MAR94] MARSHALL, S.; GRIFFITHS, J. G. A new cutter-path topology for milling machines. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 3, p. 204-214, Mar. 1994.
- [MEE92] MEEK, D. S.; WALTON, D. J. Aproximation of discrete data by  $G^1$  arc splines. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 24, n. 6, p. 301-306, June 1992.
- [MOR90] MORMANN, W. H. *et al.* CAD-CAM ceramic inlays and onlays: a case report after 3 years in place. **JADA**, v. 120, p. 517-520, May 1990.
- [MOR85] MORTENSON, M. **Geometric Modeling**. New York: John Wiley & Sons, 1985. 763 p.
- [OLI94] OLIVEIRA, L. C. **Um Estudo sobre os Métodos de Simulação e Verificação de Programas CNC**. Porto Alegre: CPGCC da UFRGS, 1994. 43 p.
- [OLI95] OLIVEIRA, L. C.; CAMARGO, L. F. S. Simulador Didático de Programas CNC - Módulo para 3 Eixos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 13., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABCM, 1995.
- [PER78] PERSSON, H. NC machining of arbitrarily shaped pockets. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 10, n. 3, p. 169-174, May 1978.
- [PER90] PERNG, D-B; CHEN, Z.; LI, R-K. Automatic 3D machining feature extraction from 3D CSG solid input. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 22, n. 5, p. 285-295, June 1990.
- [PIK77] PIKLER, G.; SIMON, V. A general dialogue system for interactive graphic programming of NC and CAD systems. In: ADVANCES IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURE, 1976, Stirling. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1977.p. 405-424.
- [PRA84] PRATT, M. T. Solid modeling and the interface between design and manufacture. **IEEE Computer Graphics & Applications**, New York, v. 4, n. 7, p. 52-59, July 1984.
- [QUE86] QUEIROZ, A. A.; STEMMER, C. Cenário da Programação CN - Da Programação Manual ao CAD/CAM. In: SIMPÓSIO SOBRE CAD/CAM REVISÃO DA SITUAÇÃO BRASILEIRA, 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SOBRACOM, 1986.



- [QUE87] QUEIROZ, A. A.; KOTUJANSKY, S. EDITE, Um Sistema de Programação NC Desenvolvido no Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE INFORMÁTICA, 20., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SUCESU, 1987, p. 545-549.
- [ROG83] ROGERS, D.; SATTERFIELD, S.; RODRIGUEZ, F. Ship Hulls, B-Splines Surfaces, and CAD/CAM. **IEEE Comp. Graphics & Applic.**, New York, v. 3, n. 9, p. 37-45, Dec. 1983.
- [SAN91] SANDVIK Coromant. **Herramientas Rotativas y Plaquetas**. Dinamarca: Stibo Graphic, 1991.
- [SCH77] SCHREITER, H. Computer-aided preparation and checking of control Tapes for NCM. In: ADVANCES IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURE, 1976, Stirling. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1977. p. 31-41.
- [SHA88] SHAH, J. J.; ROGERS, M. T. Expert form feature modelling shell. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 20, n. 9, p. 515-524, Nov. 1988.
- [SRI96] SRINIVAS, Y. L.; KUMAR K. P. V.; DUTTA, D. Surface design using cyclide patches. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 28, n. 4, p. 263-276, Apr. 1996.
- [SUH90] SUH, Y.S.; LEE, K. NC milling tool path generation for arbitrary pockets defined by sculptured surfaces. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 22, n. 5, p. 273-284, June 1990.
- [TOZ86] TOZZI, C. L. **PAC - Projeto Auxiliado por Computador**. Campinas: UNICAMP/Papirus, 1986. 168 p.
- [VIC92] VICKERS, G. W. Curved surface machining through circular arc interpolation. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 19, p. 329-337, 1992.
- [VOL95] VOLPATO, N.; AHRENS, C. H. A necessidade do auxílio de sistema CAD/CAM na fabricação de moldes de injeção de plástico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 13., 1995, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABCM, 1995.
- [WAN86] WANG, W. P., WANG, K. K. Geometric modeling for swept volume of moving solids. **IEEE Computer Graphics & Applications**, New York, v. 6, n. 12, p. 8-17, Dec. 1986.
- [WAN93] WANG, M-T. Manufacturing feature extraction and machined volume

- decomposition in a computer-integrated. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 75-86, Nov. 1993.
- [WOO88] WOODWARD, J.R. Some speculations on feature recognition. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 20, n. 4, p. 189-196, May 1988.
- [YAM84] YAMAGUCHI, K. *et al.* Computer-integrated manufacturing of surfaces using octree encoding. **IEEE Comput. Graphics & Appl.**, New York, v. 4, n. 1, p. 60-65, Jan. 1984.
- [YAN94] YANG, D. C. H.; KONG, T. Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 3, p. 225-234, Mar. 1994.
- [YEH88] YEH, Z.; YING, D. An automated interface between CAD and CAM. **Computer & Graphics**, v. 12, n. 3/4, p. 349-357, 1988.
- [YEU94] YEUNG, M. K.; WALTON, D. J. Curve fitting with arc splines for NC toolpath generation. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 11, p. 845-849, Nov. 1994.
- [ZAP77] ZAPOMUEEL, H. MAPROS PREPROCESSING - An economical solution for the integration of NC drawing and manufacture. In: ADVANCES IN COMPUTER-AIDED MANUFACTURE, 1976, Stirling. **Proceedings...** Amsterdam: North-Holland, 1977.p. 81-87.
- [ZHU90] ZHU, C. Avoiding interference in manufacturing a free-formed surface with a cylindrical end milling cutter. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 14, p. 367-371, 1990.
- [ZHU91] ZHU, C. Tool-path generation in manufacturing sculptured surfaces with a cylindrical end-milling cutter. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 17, p. 385-389, 1991.
- [ZHU93] ZHU, C. How to obtain a good surface finish in NC machining of free-formed surfaces. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 227-233, Dec. 1993.

## Bibliografía Consultada

- [BED91] BEDWORTH, D. D.; HENDERSON, M. R.; WOLFE, P. M. **Computer-Integrated Design and Manufacturing**. New York: Mc Graw-Hill, 1991. 623 p.
- [BEZ72] BEZIER, P. **Numerical Control: Mathematics and Applications**. Bristol: John Wiley & Sons, 1972.
- [BEZ89] BEZIER, P. First steps of CAD. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 5, p. 259-261, June 1989.
- [CHE93] CHEN, L-L; CHOU, S-Y; WOO, T.C. Separating and intersecting spherical polygons: computing machinability on 3-, 4-, 5-axis NC machines. **ACM Transactions on Graphics**, New York, v. 12, n. 4, p. 305-326, Oct. 1993.
- [CHE94] CHEN, C. L. P.; LECLAIR, S. R. Integration of design and manufacturing: solving setup generation and feature sequencing using an unsupervised-learning approach. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 1, p. 59-75, Jan. 1994.
- [CHO90] CHOI, B. K.; LEE, C. S. Sweep surfaces modelling via coordinate transformations and blending. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 22, n. 2, p. 87-96, Mar. 1990.
- [CHO94] CHOI, B. K. *et al.* Unified CAM-system architecture for die and mould manufacturing. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 26, n. 3, p. 235-243, Mar. 1994.
- [COG92] COGUN, C. NC part programs generation from CAD exchange files. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 20, n. 2, p. 193-202, Aug. 1992.
- [ELL89] ELLIOTT, W. S. Computer-Aided Mechanical Engineering: 1958 to 1988. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 5, p. 275-288, June 1989.
- [JAC93] JACKSON, S. D.; MITTAL, R. O. Automatic generation of 2-Axis laser-cutter NC machine program and path planning from CAD. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 21, n. 2, p. 223-231, Feb. 1993.
- [LLE89] LLEWELYN, A. I. Review of CAD/CAM. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 5, p. 297-302, June 1989.
- [MEE93] MEERAN, S.; PRATT, M. J. Automated feature recognition from 2D drawings. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 25, n. 1, p. 7-17, Jan. 1993.

- [PAL93] PALMA, J., PORTO, A. J. V. Sistema de Apoio a Programação de Controle Numérico para Usinagem de Ultra-Precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA - COBEM, 12., 1993, Brasília. **Anais...** Brasília: ABCM, 1993. p. 1571-1574.
- [PIE89] PIEGL, L. Key developments in computer-aided geometric design. **Computer-Aided Design**, Surrey, England, v. 21, n. 5, p. 262-274, June 1989.
- [THA93] THAKAR, G., SHANKER, K., JAIN, V. K. An integrated process planning and NC part programming system for rotational components. **Computers in Industry**, v. 21, n. 3, p. 341-357, Apr. 1993.
- [WAN90] WANG, W. P. Three-dimensional collision avoidance in production automation. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 15, p. 169-174, 1990.

**Informática**



**UFRGS**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

*Um Sistema de Geração de Trajetórias de Ferramentas em 3 Eixos*

por

Leandro Costa de Oliveira

Dissertação apresentada aos Senhores:

Prof. Dr. Aureo Campos Ferreira (UFSC)

Prof. Dr. Flávio Rech Wagner

Prof. Dr. Claudio Walter

Vista e permitida a impressão.

Porto Alegre, 04 / 06 / 97.

Prof. Anatólio Laschuk,  
Orientador.