

# Estudo Dirigido: Métodos para Projeto, Planejamento do Processo e Fabricação de Peças Assistidos por Computador

Alberto José Álvares<sup>1</sup>

4 de dezembro de 2001

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Disciplina de Estudo Dirigido, Tema da Tese: *Uma Metodologia de CAD/CAPP/CAM Voltada para Fabricação de Peças a Distância Através da Internet*, Orientador: Prof. João Carlos Espindola Ferreira.



# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1      | Considerações Iniciais . . . . .  | 9         |
| 1.2      | Bibliografia Consultada . . . . .   | 10        |
| 1.3      | Estrutura do Documento Escrito . . . . .  | 11        |
| <b>2</b> | <b>Introdução ao Planejamento do Processo</b>   | <b>13</b> |
| 2.1      | Introdução . . . . .  | 13        |
| 2.2      | Projeto Lógico do Plano de Processo . . . . .   | 14        |
| 2.2.1    | Abordagem a ser utilizada na tese . . . . .   | 17        |
| 2.3      | Planejamento do Roteamento do Processo . . . . .  | 18        |
| 2.3.1    | Análise do desenho da peça . . . . .  | 18        |
| 2.3.2    | Divisão da rota de processo em etapas . . . . .   | 22        |
| 2.3.3    | Concentração/Separação de operações . . . . .   | 22        |
| 2.3.4    | Seleção de tratamentos térmicos . . . . .   | 24        |
| 2.3.5    | Definição de operações auxiliares . . . . .   | 24        |
| 2.4      | Projeto/Planejamento das Operações de Usinagem . . . . .  | 24        |
| 2.4.1    | Seleção de máquinas-ferramentas . . . . .   | 24        |
| 2.4.2    | Seleção de ferramentas . . . . .  | 24        |
| 2.4.3    | Seleção de dispositivos de fixação . . . . .  | 25        |
| 2.4.4    | Seleção de superfícies de referência para a fabricação . . . . .  | 25        |
| 2.4.5    | Determinação de sobre-metais . . . . .  | 27        |
| 2.4.6    | Determinação de dimensões e tolerâncias de usinagem . . . . .   | 29        |
| 2.4.7    | Seleção de condições de corte . . . . .   | 29        |
| 2.4.8    | Estabelecimento de tempos padrão . . . . .  | 30        |
| 2.4.9    | Documentação do plano de processo . . . . .   | 30        |
| 2.5      | Plano de Processo por Peça x Plano por Lote . . . . .   | 30        |
| 2.6      | Plano de Processo <i>on-line</i> x <i>off-line</i> . . . . .  | 33        |
| <b>3</b> | <b>Estratégias nas Atividades de Planejamento do Processo</b>   | <b>35</b> |
| 3.1      | Seleção de Processos de Usinagem, Ferramentas e Parâmetros de Corte - Abordagem <i>Top-Down</i> . . . . . | 35        |
| 3.2      | Determinação do Tipo de Operação . . . . .  | 37        |
| 3.2.1    | Capacidade do processo e seus limites . . . . .   | 37        |
| 3.2.2    | Algoritmo para seleção das operações de corte x Tabelas de roteamento . . . . .                           | 38        |
| 3.2.3    | Determinação de sobre-materiais de usinagem . . . . .   | 39        |
| 3.2.4    | Determinação de condições de usinagem e tempos padrão . . . . .   | 39        |
| 3.3      | Posicionamento de uma Peça . . . . .  | 40        |
| 3.3.1    | Fixação em um torno . . . . .   | 41        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>4</b>  | <b>O Uso de Computadores em Projeto e Manufatura</b>                   | <b>43</b>  |
| 4.1       | CAD . . . . .  | 43         |
| 4.1.1     | Funcionalidade oferecida pelos sistemas de CAD atuais . . . . .        | 46         |
| 4.1.2     | Restrições nos atuais sistemas CAD . . . . .                           | 47         |
| 4.2       | CAPP . . . . .   | 49         |
| 4.2.1     | Abordagens de sistemas CAPP . . . . .                                  | 49         |
| 4.2.2     | Funcionalidade de sistemas de CAPP e exemplos . . . . .                | 51         |
| 4.2.3     | Restrições dos sistemas de CAPP comerciais . . . . .                   | 51         |
| 4.3       | CAM . . . . .  | 54         |
| 4.3.1     | Integração ao ambiente . . . . .                                       | 55         |
| <b>5</b>  | <b>Integração Projeto e Manufatura Baseado em <i>Features</i></b>      | <b>57</b>  |
| 5.1       | Diferentes Visões sobre <i>Features</i> . . . . .                      | 57         |
| 5.2       | O Elo de Ligação Entre as Atividades de Projeto e Manufatura . . . . . | 59         |
| 5.3       | Reconhecimento de <i>Features</i> . . . . .                            | 60         |
| 5.4       | Mapeamento de <i>Features</i> . . . . .                                | 61         |
| 5.4.1     | Projeto com <i>features</i> de forma . . . . .                         | 61         |
| 5.4.2     | Projeto com <i>features</i> de manufatura . . . . .                    | 62         |
| 5.5       | Pesquisas Realizadas em <i>Features</i> . . . . .                      | 62         |
| <b>6</b>  | <b>Sistemas CAPP Voltados Para Operações de Torneamento</b>            | <b>65</b>  |
| 6.1       | ROUND . . . . .  | 65         |
| 6.1.1     | Arquitetura de ROUND . . . . .   | 65         |
| 6.2       | TECHTURN (Technological Oriented Turning System) . . . . .             | 68         |
| 6.2.1     | Módulos do sistema TECHTURN . . . . .                                  | 68         |
| 6.2.2     | AUTOPLAN um Sistema de Planejamento do Processo Automatizado . . . . . | 70         |
| 6.2.3     | Análise do sistema AUTO-PLAN . . . . .                                 | 75         |
| 6.3       | CAPP Grima . . . . .   | 75         |
| 6.3.1     | A estrutura do sistema . . . . .                                       | 76         |
| 6.3.2     | Hierarquia de <i>features</i> . . . . .                                | 79         |
| 6.3.3     | A célula de manufatura . . . . .                                       | 80         |
| 6.3.4     | Estratégias de usinagem . . . . .                                      | 81         |
| 6.3.5     | Análise do sistema CAPP . . . . .                                      | 83         |
| 6.4       | Seicos Sigma $\Sigma$ 10L Multi Control . . . . .                      | 86         |
| <b>7</b>  | <b>Lógica de Decisão em CAPP Generativo</b>                            | <b>87</b>  |
| 7.1       | Árvores de Decisão . . . . .   | 87         |
| 7.1.1     | Código de Computador . . . . .   | 87         |
| 7.1.2     | Dados . . . . .  | 89         |
| 7.2       | Tabelas de Decisão . . . . .   | 89         |
| 7.3       | Inteligência Artificial . . . . .                                      | 89         |
| 7.3.1     | Abordagem através de sistemas multi-agentes (MAS) . . . . .            | 92         |
| 7.3.2     | Sistemas especialistas . . . . .                                       | 92         |
| 7.4       | Qual Modelo de Tomada de Decisão Utilizar ? . . . . .                  | 97         |
| <b>8</b>  | <b>Planejamento do Processo com Alternativas</b>                       | <b>99</b>  |
| 8.1       | Razões para Utilização de Planos de Processo Alternativos . . . . .    | 99         |
| 8.2       | Grafos E/OU (AND/OR) . . . . .   | 100        |
| 8.3       | Redes de Petri . . . . .   | 103        |
| 8.3.1     | Modelagem do Planejamento do Processo Através de PNs . . . . .         | 103        |
| <b>9</b>  | <b>Implantação de Infra-Estrutura no Grima</b>                         | <b>107</b> |
| <b>10</b> | <b>Conclusões</b>  | <b>109</b> |

# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Atividades de planejamento do processo. . . . .  | 15 |
| 2.2  | Diferentes formas de dimensionamento (a) cotagem paralela (b) cotagem em série (c) cotagem combinada. . . . .                              | 19 |
| 2.3  | Diferentes alternativas de seqüências de usinagem de uma peça. (a) desenho da peça (b) seqüência adequada (c) seqüência incorreta. . . . . | 19 |
| 2.4  | Relação entre referências de projeto, fabricação, posicionamento e medição nas superfícies de uma peça. . . . .                            | 26 |
| 2.5  | Situação onde as referências de projeto e fabricação não são as mesmas. (a) Projeto. (b) Fabricação. . . . .                               | 26 |
| 2.6  | Superfície que será usinada mostrando dimensões e sobre-metal parcial com respectivas tolerâncias. . . . .                                 | 28 |
| 2.7  | Dimensões das operações executadas numa superfície plana externa, juntamente com os sobre-metais adotados. . . . .                         | 29 |
| 2.8  | Esboço de um roteamento de processo. . . . .   | 31 |
| 2.9  | Esboço de um plano de operações. . . . .   | 32 |
| 2.10 | (a) Anel a ser fabricado. (b) Barra utilizada como matéria-prima. . . . .  | 33 |
| 2.11 | (a) Furação para uma única peça. (b) Furação para várias peças de uma só vez. . . . .  | 33 |
| 3.1  | Peça exemplo (HALEVI e WEILL, 1995; SUNDARAM, 1986) . . . . .  | 36 |
| 4.1  | Exemplo da representação B-rep. . . . .  | 44 |
| 4.2  | Exemplo da representação CSG. . . . .  | 45 |
| 4.3  | Arquitetura do sistema PART. . . . .   | 52 |
| 4.4  | Arquitetura do sistema PART-S. . . . .   | 53 |
| 5.1  | Exemplos de <i>features</i> . . . . .  | 58 |
| 6.1  | Arquitetura do sistema ROUND. . . . .  | 66 |
| 6.2  | Uma tela da definição geométrica do sistema ROUND. . . . .   | 67 |
| 6.3  | Uma tela associada a uma ferramenta de acabamento e a correspondente área de usinagem. . . . .   | 68 |
| 6.4  | Fluxograma do sistema TECHTURN. . . . .  | 69 |
| 6.5  | Estrutura do sistema AUTOPLAN. . . . .   | 71 |
| 6.6  | Tipos de placas utilizadas (HUANG, 1988). . . . .  | 71 |
| 6.7  | Árvores de decisão utilizadas no AUTOPLAN (HUANG, 1988). . . . .   | 72 |
| 6.8  | Um exemplo do procedimento associado a uma árvores de decisão (HUANG, 1988). . . . .   | 73 |
| 6.9  | Arquitetura do sistema mostrando partes fixas e móveis que o constituem. . . . .   | 78 |
| 7.1  | Implementação árvore de decisão em um programa. . . . .  | 88 |
| 7.2  | Representação através de árvore de decisão e tabela de decisão para o mesmo problema. . . . .  | 90 |
| 7.3  | Sistema especialista realizando encadeamento para trás para provar uma hipótese (H0). . . . .  | 96 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 8.1 | Uma peça contendo uma cavidade e um <i>slot</i> e o correspondente grafos E/OU. . . . | 101 |
| 8.2 | Grafos E/OU e a representação através de arquivo ASCII com a semântica associada.     | 102 |
| 8.3 | Modelagem por PNs. . . . .  | 104 |
| 8.4 | Tabela de usinagem, operações de usinagem e grafo de precedência . . . . .            | 104 |
| 8.5 | PNs e plano de processo. . . . .  | 105 |
| 8.6 | Peça exemplo (CAM-Is ANC 101). . . . .  | 106 |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Precisão e acabamento superficial, obtidos por diversos processos, na usinagem de uma superfície cilíndrica externa. . . . . | 20 |
| 2.2 | Rotas de usinagem para superfície cilíndrica externa . . . . .   | 21 |
| 2.3 | Sobre-metal que deve ser utilizado no torneamento de uma superfície cilíndrica externa. . . . .                              | 28 |
| 3.1 | Passes e Ferramentas especificados para cada operação . . . . .  | 36 |
| 3.2 | Tabela das Anteriores. . . . .   | 37 |





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

Esta disciplina de Estudo Dirigido, *Métodos para Projeto, Planejamento do Processo e Fabricação de Peças Assistidos por Computador*, tem por objetivo dar subsídios ao desenvolvimento da tese de doutorado do aluno Alberto José Álvares nos aspectos referentes ao Planejamento de Processo Auxiliado por Computador (CAPP). O tema de tese está associado ao desenvolvimento de "Uma Metodologia de CAD/CAPP/CAM Voltada para a Fabricação de Peças de Revolução a Distância através da Internet", bem como a sua implementação computacional.

Além desta disciplina o doutorando irá cursar mais uma disciplina no primeiro período de 2002 que abordará os aspectos computacionais relacionados às linguagens de programação voltadas à Internet, base de dados relacional, *shells* de sistemas especialistas, sistemas multi-agentes, arquitetura cliente/servidor, sistemas distribuídos, lógica fuzzy, Unix, modelagem sólido e geométrico utilizando Java e ACIS®, entre outras. Com estas duas disciplinas cursadas no formato de estudo dirigido acredita-se que grande parte dos aspectos referentes à revisão bibliográfica necessários ao exame de qualificação estarão cobertos. A data prevista para realização do exame de qualificação é setembro de 2002.

A ementa e o programa associados à disciplina são apresentados a seguir.

EMENTA: Projeto de peças assistido por computador (CAD). *Features* em componentes mecânicos. *Features* de projeto e manufatura. Padronização de *features*. Formato padrão STEP. Representação de peças no computador através de *features*. Utilização de *features* na indústria. Planejamento do processo assistido por computador (CAPP). Informações necessárias para o planejamento do processo. Planejamento do processo contendo alternativas. Representação de planos de processo no computador. Tomada de decisões no CAPP. Gerenciamento de banco de dados para o CAPP. Geração do programa de comando numérico (código "G") para a usinagem de uma peça (CAM). Implantação de uma infra-estrutura computacional para desenvolvimento de atividades de CAD/CAPP/CAM.

PROGRAMA:

- Projeto de peças assistido por computador (CAD).
- *Features* em componentes mecânicos. Estes componentes poderão ser rotacionais ou prismáticos.
- *Features* de projeto e manufatura.
- Padronização de *features*.
- Formato padrão STEP.
- Representação de peças no computador através de *features*.

- Utilização de *features* na indústria.
- Planejamento do processo assistido por computador (CAPP). Definição e objetivos. Abordagens Variante e Generativa.
- Informações necessárias para o planejamento do processo: operações, máquinas, ferramentas, dispositivos de fixação.
- Planejamento do processo contendo alternativas. Comparação com o plano de processos fixo.
- Representação de planos de processo no computador: redes de Petri, grafos E/OU, matrizes.
- Tomada de decisões no CAPP: sistemas especialistas, redes neurais, algoritmos genéticos, lógica difusa.
- Gerenciamento de banco de dados para o CAPP. Utilização do banco de dados relacional no CAPP.
- Geração do programa de comando numérico (código "G") para a usinagem de uma peça (CAM).
- Implantação de uma infra-estrutura computacional para desenvolvimento de atividades de CAD/CAPP/CAM. Instalação de gerenciadores de bancos de dados, servidor Web, shell para sistemas especialistas, sistema CAD/CAM.

## 1.2 Bibliografia Consultada

Para realização deste estudo dirigido foi consultado uma grande quantidade de material bibliográfico disponível em diversas mídias (*Journals on-line*/Internet, *Journals* impressos, Livros, teses e dissertações on-line e impressas, *sites* da Internet, etc). O material consultado através de arquivos (pdf, html, txt, doc, etc) está disponível em: <ftp://omega.enm.unb.br/pub/doutorado>. Este servidor armazena cerca de dois gigabytes de informações de interesse para o doutorado, tanto para esta disciplina quanto para a segunda disciplina de estudo dirigido.

A seguir é apresentada a bibliografia básica definida no programa da disciplina e que foi estudada.

- Ferreira, J.C.E., "Planejamento do Processo Assistido por Computador - CAPP", Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1996.
- Wang, H.P. e Li, J.K., *Computer-Aided Process Planning, Advances in Industrial Engineering*, Vol. 13, Elsevier, 1991.
- Chang, T.C., Wysk R.A. e Wang, H.P., "Computer Aided Manufacturing", Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, W.J. Fabrycky e J.H. Mize (eds.), 2ns Edition, 1998.
- Halevi, G. e Weill, R.D., "Principles of Process Planning: A Logical Approach", Chapman & Hall, 1995.
- Halevi, G., "Restructuring the Manufacturing Process: Applying the Matrix Method", St. Lucie Press, 1999.
- ISO TC184/WG3 N324 -T7, ISO 10303 - Part 224 Mechanical Product Definition for Process Planning Using Form Features, South Carolina, EUA, 1994.
- Shah, J.J. e Mäntylä, M., "Advances in Feature Based Manufacturing", Elsevier, 1994.
- Anais do International IFIP Conference on Feature Modeling and Advanced Design-For-The-Life-Cycle Systems, Valenciennes, França, 12-14 de Junho, 2001.

## 1.3 Estrutura do Documento Escrito

Após discussão com o Prof. João Carlos Espíndola Ferreira sobre o conteúdo a ser apresentado neste documento, definiu-se que deveria ter como escopo os aspectos referentes ao Planejamento do Processo associados às operações de torneamento. Assim, este relatório irá descrever os vários aspectos que constituem o programa da disciplina direcionado para as operações de torneamento (peças rotacionais).

A fim de se ter um estrutura lógica, este relatório é dividido em dez capítulos que cobrem todos os aspectos que compõem o programa da disciplina. O capítulo dois apresenta uma introdução ao planejamento do processo descrevendo suas funções básicas. O capítulo três apresenta estratégias usadas nas atividades de planejamento do processo. O capítulo quatro discute o uso dos computadores no projeto e na manufatura. O capítulo cinco aborda o projeto de peças baseado em *features* de projeto e manufatura como elemento de integração entre o projeto e a manufatura. O capítulo seis apresenta o planejamento do processo auxiliado por computador (CAPP) dando maior enfoque à abordagem generativa e apresentando uma revisão bibliográfica dos vários sistemas CAPP desenvolvidos para operações de torneamento. O capítulo sete apresenta uma análise sobre as diversas abordagens utilizadas para tomada de decisão no CAPP derivadas de técnicas de representação do conhecimento e abordagens clássicas. O capítulo oito aborda o planejamento do processo contendo alternativas e as técnicas utilizadas para representação de planos de processo no computador. O capítulo nove descreve algumas ações que foram desenvolvidas para implantação de infra-estrutura computacional para o desenvolvimento de atividades de CAD/CAPP/CAM nas instalações físicas do GRIMA (Grupo de Integração da Manufatura). O capítulo dez apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido.



## Capítulo 2

# Introdução ao Planejamento do Processo

### 2.1 Introdução

O planejamento do processo é uma função vital nas indústrias de manufatura pois fornece as informações necessárias para a transformação de matéria-prima ou produtos semi-acabados em produtos final (CHANG *et al*, 1998). Os processos de manufatura utilizados para conversão de matéria-prima em peças acabadas, mais usualmente utilizados são: fundição, forjamento, soldagem, puncionamento, estampagem, usinagem, tratamentos térmicos e químicos, entre outros. Os requisitos associados a seleção de um processo podem ser divididos em requisitos para a *peça* e para o *processo* (SMITH, 1999).

Os requisitos da peça estão associados aos aspectos funcionais sendo definidos no projeto da peça sem levar em conta a quantidade a ser produzida. Por outro lado, os requisitos de processo levam em conta os aspectos de negócio/econômico da manufatura (quanto, qual o custo e quando?). São requisitos da peça normalmente especificados no projeto mecânico: tolerância dimensional, tolerância de forma e posição, rugosidade superficial, forma geométrica e material. Os requisitos de processo são: tamanho do lote, custo de *setup*, tempo de *setup*, custo por peça e taxa de produção. O projeto mecânico de um novo produto deve incluir estes atributos para possibilitar à atividade de planejamento do processo a especificação do plano de processo, preferencialmente, com alternativas que será utilizado na fabricação da peça. Maiores informações podem ser obtidas em: [http://omega.enm.unb.br/pub/doutorado/disco2/telemanufacturing1/berkeley/cybercut.berkeley.edu/html/papers/MAS\\_Thesis](http://omega.enm.unb.br/pub/doutorado/disco2/telemanufacturing1/berkeley/cybercut.berkeley.edu/html/papers/MAS_Thesis).

As decisões associadas ao planejamento do processo são (WANG & LI, 1991):

- Seleção da matéria-prima e seu método de fabricação.
- Seleção dos processos de usinagem das superfícies das peças.
- Determinação da seqüência de operações.
- Determinação da fixação da peça para cada operação.
- Seleção do equipamento e ferramentas para as operações de usinagem.
- Determinação das dimensões e tolerâncias operacionais para as operações de usinagem.
- Seleção das condições de usinagem e determinação dos tempos padrões para cada operação.

Segundo Rezende (1996) “Planejamento de processos pode ser definido como a atividade de selecionar e definir os processos que devem ser executados para transformar um material bruto em um produto acabado (SALOMONS, HOUTEN e KALS, 1993). Planejamento de processos é a seleção e

seqüenciamento de processos de manufatura para converter uma matéria prima em um componente acabado, de acordo com especificações funcionais (IRANI, KOO e RAMAN, 1995). De acordo com Wysh *et al* citados por HUANG (1988), o planejamento do processos pode ser definido como o módulo responsável pela conversão de dados de projeto em instruções de trabalho. De acordo com Alting e Zhang (1989) planejamento do processos é definido como a determinação sistemática dos métodos que permitem que um produto seja manufaturado econômica e competitivamente. Apesar das aparentes diferenças entre as definições, o que se procura enfatizar é o processo de transformação de um material bruto em um produto acabado. Quando se pensa em processos de fabricação, a tarefa de planejamento do processos consiste na escolha de alguns recursos dentre os disponíveis, como máquinas-ferramentas, ferramentas de corte, dispositivos de fixação, definição de seqüência de operações, definição de condições de corte e definição de operações auxiliares.”

Segundo Halevi e Weil (1995) as atividades de planejamento do processo (figura 2.1) compreendem, principalmente:

- uma interpretação das especificações contidas na definição do desenho da peça, incluindo principalmente tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas, rugosidade superficial, tipo de material, dimensão da matéria-prima, número de peças no lote, etc (requisitos da peça e do processo);
- seleção de processos e ferramentas para processamento da peça e suas *features* respeitando as restrições impostas na definição do desenho;
- determinação das tolerâncias de fabricação e dimensões de montagem para garantir as tolerâncias de projeto em função das limitações das dimensões de fabricação por razões de comodidade e capacidade da máquina-ferramenta;
- seleção das superfícies de partida e de referência para garantir a execução precisa do processamento das operações, simultaneamente com a seleção de dispositivos de fixação e a estabilidade da peça através de uma apropriada fixação;
- seqüenciamento de operações com função de prioridades impostas pelas restrições tecnológicas e de precisão;
- agrupamento de operações elementares sobre a mesma máquina objetivando a redução do tempo, respeitando os requisitos de precisão;
- seleção de máquinas para executar as operações, levando em conta o número de peças a ser produzido (tamanho do lote);
- seleção de métodos e sistemas de medição para garantir a conformidade dos componentes em relação aos requisitos funcionais;
- determinação das condições de processamento para cada operação elementar levando em conta os tempos e custos de processamento/trabalho a fim de se realizar uma avaliação econômica;
- edição e montagem das folhas de processo para serem disponibilizados em um plano de processo exeqüível e de preferência com alternativas para serem transferidos para o departamento de manufatura para execução.

## 2.2 Projeto Lógico do Plano de Processo

A ordem de execução das atividades de planejamento do processo não necessita ser exatamente a apresentada na figura 2.1. De acordo com Halevi e Weil (1995) o projeto lógico do plano de processo deve seguir a seguinte ordem:

- Análise preliminar da peça mecânica.

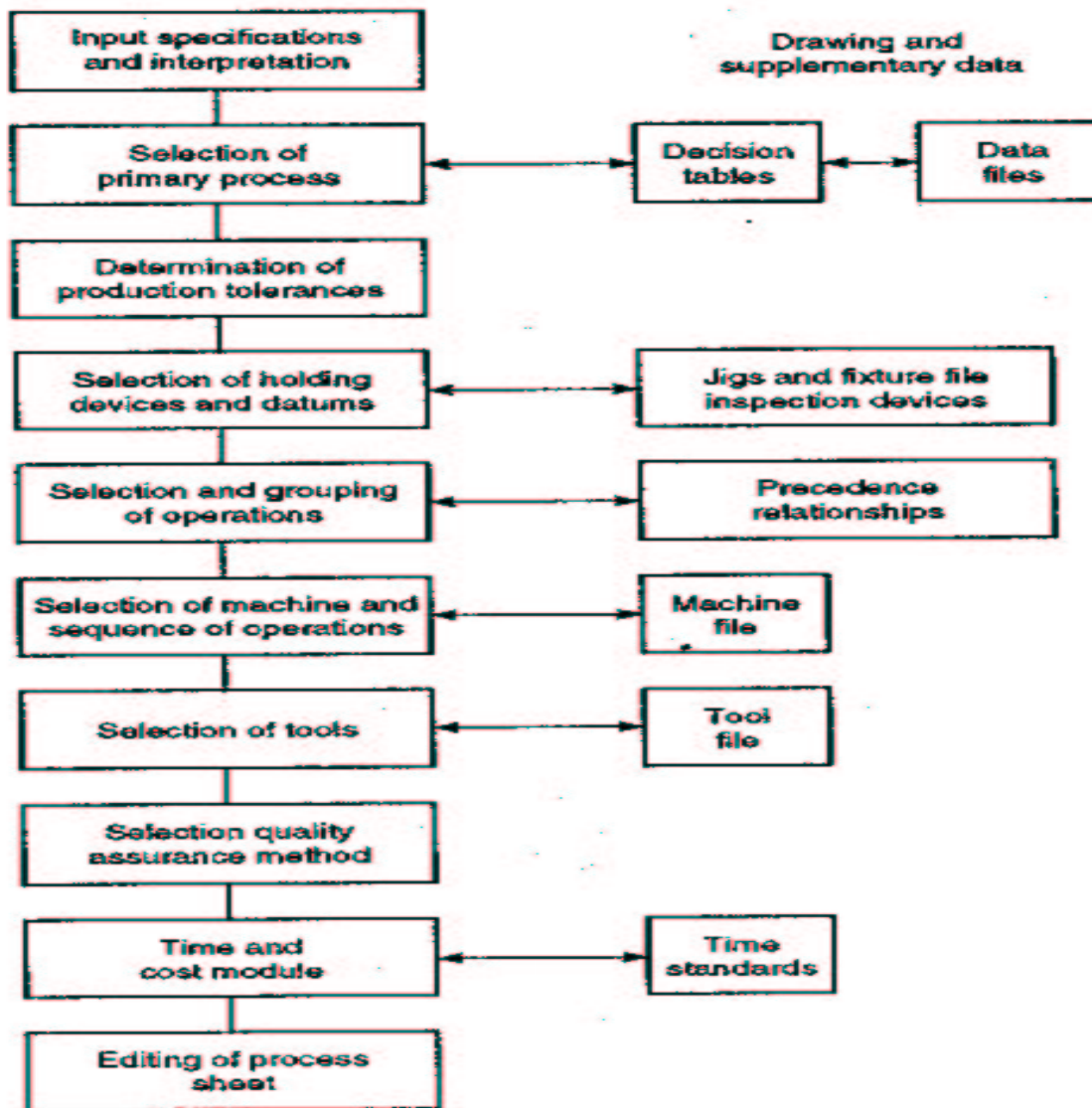


Figura 2.1: Atividades de planejamento do processo.

- Seleção dos processos de usinagem (operações elementares), ferramentas e parâmetros de corte.
- Grupagem dos processos dentro de operações (*jobs*).
- Seleção de máquinas-ferramenta.
- Seqüenciamento das operações de acordo com as relações de precedência segundo as restrições de ordem: dimensional, tolerâncias geométricas, tecnológica (desbaste antes de pré-acabamento) e econômicas (redução do custo de produção e desgaste/quebra de ferramenta, por exemplo).
- Seleção dos dispositivos de fixação e referências dimensionais.
- Preparação final do arquivo com o plano de processo para a peça.

Nesta abordagem a seleção da máquina-ferramenta é feita após ter-se escolhido os parâmetros de corte através dos métodos baseados no mínimo tempo de produção (maior produtividade) ou menor custo de usinagem. Por este método as restrições para escolha da máquina baseiam-se nas condições tecnológicas de usinagem que irão definir a potência e a velocidade requerida para a máquina a ser selecionada e outras restrições disponíveis. Em planejamento do processo cada escolha feita em uma atividade irá causar uma restrição nas atividades posteriores. Estas restrições devem ser administradas para que se consiga definir planos de processos executáveis, realistas e com alternativas.

Segundo Wang & Li (1991) o planejamento do processo pode ser dividido em dois estágios: planejamento do roteamento e projeto da operação de usinagem. No primeiro caso faz-se um planejamento global dos processos de fabricação de uma peça tendo como objetivo a determinação do conteúdo e da seqüência de operações no plano de processos. Os fatores considerados são: material, especificações técnicas da peça, características da matéria-prima, volume de produção, máquinas, ferramentas, sistemas de medição, dispositivos de fixação, entre outros. Tendo-se identificado as operações a serem executadas no planejamento de roteamento de operações parte-se para o segundo estágio, o projeto das operações de usinagem.

A partir da listagem da ordem lógica das operações fornecida pelo roteamento deve-se realizar um detalhamento do plano de processos com as informações necessárias para as instruções de fabricação da peça. De forma bastante semelhante a abordagem de Halevi & Weil (1995) temos as seguintes atividades no estágio associado ao planejamento do roteamento:

- Análise do desenho da peça.
- Seleção dos processos e rotas de usinagem para cada superfície da peça a ser usinada (*feature*).
- Determinação do conteúdo de cada operação e o número de operações de usinagem.
- Determinação da seqüência de operações.
- Seleção das referências de apoio para cada operação.
- Arranjo de operações de tratamento térmico.
- Arranjo de operações auxiliares (inspeção, limpeza, etc).

As seguintes atividades são efetuadas no projeto de operações de usinagem:

- Seleção da máquina e ferramental para cada operação.
- Arranjo da seqüência de operações elementares em cada operação.
- Determinação dos sobre-material para cada superfície a ser usinada.
- Determinação das cotas e tolerâncias de fabricação para cada operação.
- Determinação das condições de usinagem para cada operação.
- Estimativa de tempos padrões para cada operação.



### 2.2.1 Abordagem a ser utilizada na tese

As duas sistemáticas de divisão das atividades de planejamento do processo (Halevi x Wang) são bastante semelhantes sendo que um dos aspectos que as difere é a ordem, o momento, onde se executa a atividade associada à seleção da máquina-ferramenta. Na abordagem Wang & Li (1991) esta atividade é a primeira a ser realizada no estágio de projeto de operações de usinagem. Isto impõe uma forte restrição à tomada de decisão associada às demais atividades e principalmente na determinação das condições de usinagem para cada operação. A abordagem Halevi & Weill (1995) é menos restritiva com relação a escolha da máquina quando comparado a ordem de atividades de Wang & Li (1991) e analisando o exemplo apresentado por Halevi e Weill (1995) no capítulo dez do seu livro (“*Example of fully-decveloped process plan*”) nota-se como o método tem consistência com um abordagem bastante lógica e estruturada.

As duas abordagens mantêm uma estreita correlação e muitas vezes podem ser utilizadas de forma complementar. No caso do estudo dirigido com enfoque na tese de doutorado e na aplicação que se pretende desenvolver, onde já se conhece uma das restrições para tomada de decisão que diz respeito a máquina que será utilizada (Centro de Torneamento CNC) a abordagem Wang & Li (1991) parecer ser a mais racional, pois não haverá máquinas alternativas para serem utilizadas. A partir deste enfoque a abordagem de Halevi (1999) que aplica o *Matrix Method* (QUEIROZ & LUCERO, 2001) como método de otimização baseada em planos de processos alternativos perde o sentido por se estar trabalhando apenas com uma máquina de comando numérico tendo como critério de otimização a fabricação com o menor número possível de fixações da peça na máquina e *setup* da ferramenta.

Desta forma busca-se uma otimização do sistema de usinagem MFFP (*Máquina, Dispositivo de Fixação, Ferramenta e Peça* - MFTW em inglês) em função da quantidade de fixações necessárias da peça para possibilitar a execução de todo o plano de processo em uma única máquina. Por outro lado pode-se trabalhar com planos de processos alternativos baseado em operações alternativas a serem processadas em uma única máquina. Em Ferreira & Wysk (2001) e Kiritsis & Porchet (1996) são apresentados dois métodos para representação de planos de processos não lineares, com alternativas, baseados em Grafos E/OU e Redes de Petri, respectivamente. Os dois métodos serão tratados com mais detalhes nos capítulos seguintes.

Os sistemas de planejamento do processo automatizados relatados na literatura como ROUND, RNDFIX, XPLANES, PART e PARTS (HOUNTEN, 1991 e ERVE, 1985) implementam as seguintes funções de planejamento de operações e processos:

- Interpretação do modelo de produto;
- Seleção de máquinas-ferramenta;
- Seleção de ferramentas;
- Determinação de *setups*;
- Projeto de fixações;
- Determinação dos métodos/operações de usinagem;
- Seleção de ferramentas de corte;
- Determinação das sequências de usinagem;
- Cálculo das trajetórias de ferramenta;
- Cálculo das condições de usinagem;
- Geração do programa NC;
- Planejamento de Capacidade.

Normalmente, nestes sistemas custo e *Throughput* são objetivos secundários a serem obtidos e os recursos disponíveis (máquinas-ferramenta, ferramentas de corte e mão-de-obra) são as restrições. A partir destes recursos disponíveis deve-se buscar a elaboração de um plano de processo exequível e realista.

## 2.3 Planejamento do Roteamento do Processo

É um planejamento geral onde se faz a análise da peça determinando as operações necessárias à sua fabricação e estabelecendo uma rota de processo para fabricação da peça. A seguir são apresentadas as etapas associadas a este estágio do planejamento do processo baseado nos trabalhos de Wang & Li (1991) e Rezende (1996).

### 2.3.1 Análise do desenho da peça

Como o desenho da peça é a base para a geração do plano de processo, a sua análise deve ser o primeiro passo para a definição da rota do processo. A análise a ser empreendida deve considerar os fatores:

#### **estrutura da peça**

As peças fabricadas por usinagem apresentam formas e tamanhos variados, contudo é possível descrever uma peça em termos de formas básicas como cilindros, planos, cones, etc. Uma análise cuidadosa da estrutura da peça é importante, pois a seleção do método de usinagem a utilizar para cada superfície é função da sua forma básica. Por exemplo, uma superfície cilíndrica externa é feita, normalmente, num torno. As dimensões de cada superfície também são de grande importância, pois dentro de um mesmo tipo de superfície, diferentes operações poderão ser necessárias, como no caso de uma superfície de revolução que pode se apresentar na forma de um eixo, um disco, um anel ou um tubo. Assim, se o processista conhece as formas básicas e as dimensões de uma peça saberá quais são os métodos de usinagem mais adequados.

#### **Observação de superfícies críticas e menos críticas.**

Uma superfície é dita crítica quando mantém contato com as superfícies de outras peças, já as que não apresentam este tipo de contato são ditas menos críticas. As superfícies críticas são aquelas que apresentam maior exigência de precisão. Desta forma, o planejamento do processos deverá dar maior prioridade às operações feitas nestas superfícies. Com base na precisão e acabamento especificados para uma superfície crítica, se determina qual o método de usinagem a ser utilizado na operação de acabamento. As operações de desbaste e semi-acabamento são determinadas em função do método especificado para o acabamento. Assim o processista tem idéia dos principais métodos de usinagem que serão utilizados.

#### **Estudo do material e de tratamentos térmicos**

As propriedades mecânicas do material de uma peça são um fator importante na seleção do método de usinagem, pois apresentam grande influência nas condições de corte que poderão ser utilizadas. Como tratamentos térmicos alteram as propriedades mecânicas, devem ser observados com cuidado.

#### **Estudo das dimensões entre as superfícies da peça**

As dimensões entre as superfícies de uma peça podem ser apresentadas de três formas. A figura 2.2 (a) mostra a cotação paralela, onde todas as dimensões se referem a uma única superfície. A figura 2.2 (b) mostra a cotação em série. A figura 2.2 (c) mostra a cotação combinada, que por sinal, é o método mais comum de dimensionamento de peças. A forma como as superfícies de uma

peça são dimensionadas influencia na seqüência de operações, pois segundo WANG e LI (1991), o princípio de coincidência de cotas deve ser seguido.

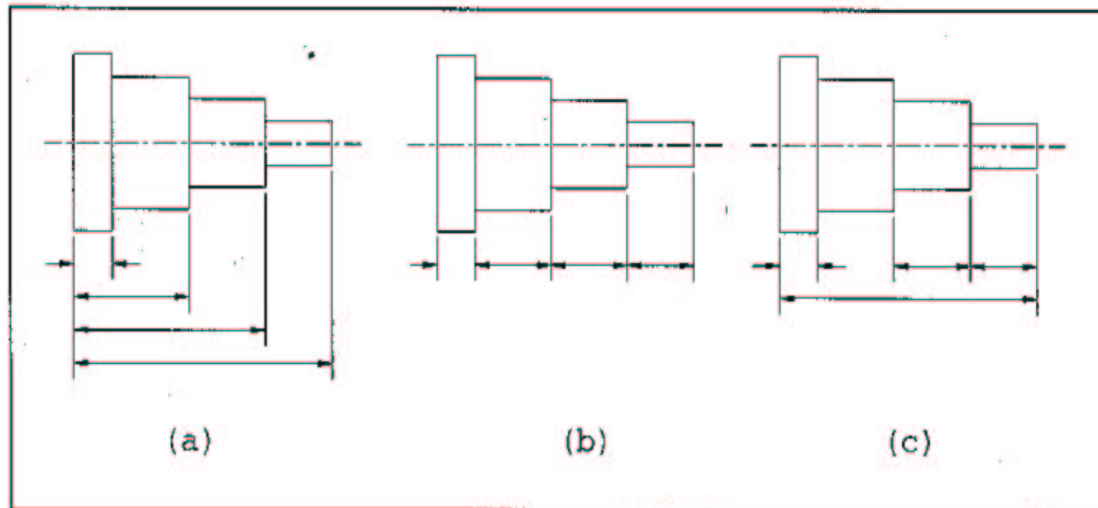


Figura 2.2: Diferentes formas de dimensionamento (a) cotagem paralela (b) cotagem em série (c) cotagem combinada

A figura 2.4 (a) mostra o desenho de uma peça com suas respectivas cotas. As figuras 2.4 (b) e (c) mostram duas possíveis formas de usinar a peça. Na seqüência apresentada em (b), as dimensões do desenho serão diretamente obtidas na fabricação, ou seja, ocorre a coincidência entre cotas de projeto e de fabricação. Na seqüência apresentada em (c) duas dimensões de projeto serão obtidas numa única operação de usinagem, o que leva, inevitavelmente, a uma redução nas tolerâncias desta operação, pois será necessária uma transferência de cotas (LOPES, 1983). Assim, a seqüência apresentada em (b) é, obviamente, mais adequada que a apresentada em (c). Percebe-se então, que a seqüência de usinagem é função das cotas do desenho da peça.

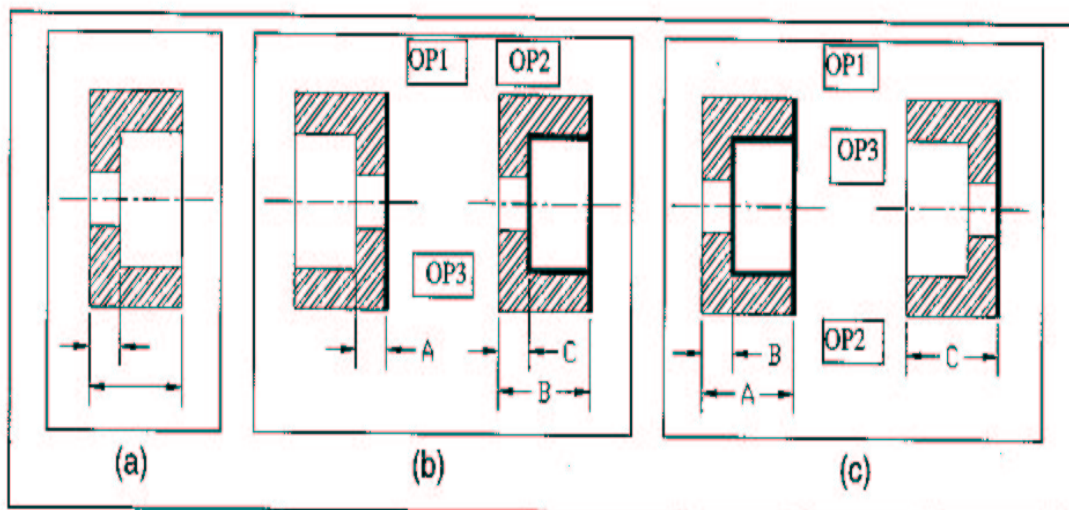


Figura 2.3: Diferentes alternativas de seqüências de usinagem de uma peça. (a) desenho da peça (b) seqüência adequada (c) seqüência incorreta.

A seleção do método de usinagem de uma determinada superfície é uma das etapas mais importantes do planejamento do processo, pois o método utilizado está diretamente ligado à precisão obtida e aos custos de produção. Para que o processista possa escolher adequadamente um método de usinagem, é necessário que tenha conhecimento dos diversos processos disponíveis, assim como das características que os cercam, como máquinas e ferramentas necessárias.

Como processos convencionais de usinagem pode-se citar: torneamento, furação, fresamento, mandrilamento, retificação, entre outros. Para a usinagem de peças complexas ou de materiais de baixa usinabilidade (ligas de alta dureza), utilizam-se processos não-convencionais de usinagem como: eletro-erosão (EDM), usinagem eletroquímica (ECM), usinagem por ultrassom, etc.

Cada método de usinagem pode garantir uma certa precisão, sob determinadas condições. A tabela 2.1 mostra a precisão e o acabamento superficial, que podem ser obtidos por diversos processos, na usinagem de uma superfície cilíndrica externa. É importante observar que estes dados se referem a condições padrão de máquinas, ferramentas, condições de corte e operador.

Tabela 2.1: Precisão e acabamento superficial, obtidos por diversos processos, na usinagem de uma superfície cilíndrica externa.

| PROCESSO              | CLASSE DE TOLERÂNCIA (IT) | ACABAMENTO SUPERFICIAL Ra(mm) |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Torneamento           |                           |                               |
| Desbaste              | 12-13                     | 10-80                         |
| Semi-Acabamento       | 10-11                     | 2,5-10                        |
| Acabamento            | 7-9                       | 1,25-2,5                      |
| Ultraprecisão         | 5-6                       | 0,08-1,25                     |
| Torneamento de Canais |                           |                               |
| Em um passe           | 11-12                     | 10-20                         |
| Em dois passes        | 10-11                     | 2,5-10                        |
| Retificação           |                           |                               |
| Desbaste              | 7-9                       | 0,63-2,5                      |
| Semi-Acabamento       | 6-7                       | 0,16-0,63                     |
| Acabamento            | 5-6                       | 0,08-0,16                     |
| Lapidação             |                           |                               |
| Semi-Acabamento       | 5-6                       | 0,04-0,63                     |
| Acabamento            | 3-5                       | 0,008-0,08                    |
| Super-Acabamento      | 3-5                       | 0,008-0,16                    |
| Polimento             | 3-5                       | 0,008-1,25                    |

A seleção de um método de usinagem, para uma dada superfície, deve considerar os seguintes fatores principais:

- forma da superfície;
- dimensões da superfície;
- precisão e acabamento superficial requeridos;
- forma geral da peça;
- peso da peça;
- material da peça e tratamento térmico aplicado;
- volume de produção.

Para a seleção de métodos de usinagem para uma peça, determina-se, em primeiro lugar, o método de usinagem para a operação final das superfícies mais críticas. A tabela 2.2 a seguir mostra rotas de usinagem que podem ser utilizadas para uma superfície cilíndrica externa.

Tabela 2.2: Rotas de usinagem para superfície cilíndrica externa

| No. | ROTEAMENTO   | CLASSE DE TOLERÂNCIA (IT) | ACABAMENTO SUPERFICIAL |
|-----|--|---------------------------|------------------------|
|     |  |                           | Ra( $\mu\text{m}$ )    |
| 1   | Torneamento de Desbaste  | 12-13                     | 10-80                  |
| 2   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.  | 9-11                      | 2,5-10                 |
| 3   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Torneamento de Acabamento  | 7-9                       | 1,25-2,5               |
| 4   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Torneamento de Ultraprecisão   | 5-6                       | 0,08-1,25              |
| 5   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Retificação de Desbaste  | 7-9                       | 0,63-2,5               |
| 6   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Retificação de Desbaste-<br>Retificação de Acabamento                      | 5-6                       | 0,08-0,16              |
| 7   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Retificação de Desbaste-<br>Retificação de Semi-Acab.-<br>Lapidação        | 3-6                       | 0,008-0,63             |
| 8   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Retificação de Desbaste-<br>Retificação de Acabamento.-<br>SuperAcabamento | 3-5                       | 0,008-0,16             |
| 9   | Torneamento de Desbaste-<br>Torneamento de Semi-Acab.-<br>Retificação de Desbaste-<br>Retificação de Acabamento.-<br>Polimento       | 4-5                       | 0,008-1,25             |

### 2.3.2 Divisão da rota de processo em etapas

Uma rota de processo pode ser dividida em diferentes etapas, quais sejam:

- desbaste. Grande parte do material da peça em bruto é removida através de uma operação de desbaste, ou seja, este tipo de operação visa dar à peça uma forma próxima à final. Sendo assim, o importante é a taxa de remoção de material e não o acabamento da superfície;
- semi-acabamento. O objetivo deste tipo de operação é, para superfícies menos críticas, obter o acabamento final. Já para superfícies críticas serve de preparação para a operação de acabamento;
- acabamento. Tem como objetivo garantir que superfícies críticas tenham a precisão e acabamento superficial requeridos. Sendo assim, a quantidade de material removida num passe de acabamento é mínima.

A divisão de uma rota de processo em etapas pode ser explicada com base nos seguintes motivos:

- redução da influência da deformação da peça na precisão das superfícies usinadas. Durante uma operação de desbaste, devido às severas condições de corte utilizadas, a peça fica submetida a grandes esforços, os quais provocam deformações. As dimensões obtidas, após o desbaste, são então afetadas pela deformação da peça. Como os esforços são menores numa operação de semi-acabamento e ainda mais reduzidos numa operação de acabamento, a deformação da peça, em cada etapa, será menor e as dimensões finais estarão mais próximas das desejadas;
- detectar defeitos internos no material o mais cedo possível. Se uma peça apresenta defeitos internos, que não podem ser corrigidos, todo trabalho de usinagem que for feito nesta peça será perdido. Assim, a detecção de prováveis defeitos deve ser executada o mais cedo possível. Em uma peça que apresente defeitos internos, estes serão revelados, muito provavelmente, durante as operações de desbaste e portanto o agrupamento destas operações em uma etapa torna a detecção dos defeitos mais rápida;
- evitar que superfícies acabadas sejam danificadas. Durante a fixação, o processo de corte e o transporte de uma peça, esta fica sujeita a choques que podem danificar suas superfícies. A execução de todas as operações de desbaste e semi-acabamento antes do acabamento diminui esta possibilidade.

A decisão por dividir uma rota de processo em etapas dependerá do grau de influência da deformação da peça na precisão. Para peças precisas de pequena rigidez a divisão do processo em etapas é de grande utilidade. Para peças de baixa precisão e de grande rigidez a divisão do processo em etapas não é tão importante assim (inclusive deve ser evitada), já que eleva os custos de produção (pois aumenta a quantidade de *setups*) e não traz benefícios.

Um aspecto que não pode ser esquecido, durante a divisão do processo em etapas, é a necessidade de acabamento das superfícies de referência para a fabricação mesmo durante o desbaste.

### 2.3.3 Concentração/Separação de operações

Antes de introduzir os conceitos de concentração e separação de operações é necessário que se tenha uma definição mais precisa do significado de operação, assim como da terminologia utilizada.

Um processo de fabricação é composto por um conjunto de operações que garantem que a matéria-prima seja convertida no produto acabado, sendo assim, o componente básico do processo de fabricação é a operação.

Uma operação fica caracterizada quando é definido o equipamento e a peça em que é realizada. Uma operação é constituída por um conjunto de operações elementares. Uma operação elementar fica caracterizada quando não há mudança da ferramenta, da superfície usinada e das condições de corte utilizadas. Uma operação elementar é composta por um conjunto de passes. Um passe é

caracterizado por um movimento único da ferramenta na direção do avanço ao longo da superfície usinada.

Para a execução de uma operação, são necessárias várias atividades (fixar a peça, trocar ferramentas, ligar a máquina-ferramenta, avançar a ferramenta até que toque na peça, medir a superfície usinada, etc). Dentre estas, o *setup* da peça é uma atividade de grande importância. O *setup* consiste no posicionamento e fixação da peça. Se uma operação é executada com um único posicionamento e fixação da peça então diz-se que é realizada em um único *setup*.

Após a seleção dos métodos de usinagem e a definição das etapas do processo, a usinagem das superfícies que são executadas na mesma etapa pode ser organizada em operações. O número de operações presentes num processo de fabricação depende do critério utilizado para a organização das operações: concentração ou separação.

O conceito de concentração diz que cada operação deve ser formada pelo maior número possível de operações elementares. O conceito de separação diz que cada operação deve ser o mais simples possível. Percebe-se então, que são conceitos antagônicos.

A concentração de operações é caracterizada por operações complexas e em pequeno número, resultando em:

- simplificação da programação/escalamento da produção devido ao menor número de operações;
- diminuição do tempo de manuseio da peça, pois o número de *setups* também diminui;
- utilização de equipamentos mais sofisticados;
- necessidade de operadores de máquinas mais capacitados devido à maior complexidade das operações.

A separação de operações é caracterizada por operações simples e em grande número, resultando em:

- menores exigências de equipamento e ferramental;
- preparação de máquina mais simples;
- escalamento da produção mais complicado.

A decisão pela concentração ou separação das operações baseia-se nos seguintes fatores:

1. processo dividido em etapas. Quando a fabricação da peça deve ser dividida em etapas de desbaste, semi-acabamento e acabamento, as operações elementares de diferente natureza não podem ser agrupadas em uma operação;
2. volume de produção. Para pequenos volumes de produção adota-se sempre o conceito de concentração, visando simplificar a programação da produção. Quando se trabalha com grandes volumes de produção dois caminhos podem ser seguidos: separação das operações. É adotada em plantas com equipamentos tradicionais. A eficiência do processo se baseia na simplicidade das operações; Concentração das operações. É adotada quando se dispõe de equipamentos avançados (máquinas CNC);
3. tamanho e peso da peça. Para peças grandes e pesadas (difíceis de manusear) adota-se a concentração.

### 2.3.4 Seleção de tratamentos térmicos

As operações de tratamento térmico, utilizadas em uma peça, são selecionadas com base em especificações de projeto ou necessidades do processo de fabricação. Dentre os tratamentos térmicos mais comumente utilizados pode-se citar: recozimento, normalização, envelhecimento, têmpera e revenido. As operações de usinagem assim como a qualidade da peça são influenciadas pelo tratamento térmico selecionado. Para que um correto seqüenciamento das operações seja feito, é necessário que tanto o objetivo de cada tratamento térmico quanto seu impacto na qualidade da superfície obtida sejam cuidadosamente analisados.

### 2.3.5 Definição de operações auxiliares

Além das operações de usinagem e de tratamentos térmicos, algumas operações auxiliares são definidas, num plano de processo. Operações auxiliares são aquelas que não estão diretamente relacionadas com a produção da peça. Dentre as operações auxiliares mais comuns pode-se citar: inspeção dimensional, superficial, pesagem e limpeza. Em geral as operações auxiliares são efetuadas depois das operações de usinagem.

## 2.4 Projeto/Planejamento das Operações de Usinagem

É um planejamento específico, onde cada operação definida no roteamento do processo é detalhada em termos de máquinas, ferramentas, superfícies de referência para a fabricação, dispositivos de fixação, condições de corte, etc.

As etapas presentes no planejamento detalhado das operações são apresentadas a seguir.

### 2.4.1 Seleção de máquinas-ferramentas

A máquina-ferramenta selecionada para uma dada operação influi tanto na precisão quanto na produtividade e no custo de usinagem. Na seleção de uma máquina-ferramenta os seguintes fatores devem ser observados:

- a precisão da máquina deve ser adequada à precisão requerida pela operação;
- a área de trabalho da máquina deve apresentar dimensões compatíveis com as da peça que será usinada;
- a potência da máquina deve ser suficiente para a execução da operação;
- a rigidez da máquina deve se manter durante o corte;
- a produtividade da máquina deve ser adequada ao volume de produção desejado;
- as máquinas disponíveis devem ser, sempre que possível, utilizadas.

### 2.4.2 Seleção de ferramentas

A seleção de ferramentas de corte leva em conta vários aspectos (geometria, material, tamanho, rigidez, etc) que dependem em grande parte do método de usinagem, da estratégia adotada, das dimensões da superfície a ser trabalhada, do material da peça e da precisão desejada. Sempre que possível deve-se optar por ferramentas padronizadas.

Um algoritmo para seleção de ferramentas de corte, que tem por objetivo minimizar o número de ferramentas selecionadas para a execução de uma peça é apresentado por ERVE (1988).

Um fabricante de ferramentas (SANDVIK, 1993) sugere como opção inicial, a seleção de ferramentas de uso geral (ampla gama de aplicação). Se os resultados da utilização desta ferramenta não forem satisfatórios, ferramentas específicas são apresentadas para cada tipo de corte e material.



### 2.4.3 Seleção de dispositivos de fixação

Dispositivos de fixação são necessários para sujeitar a peça na máquina-ferramenta. Sempre que possível deve-se utilizar dispositivos de fixação padronizados como placas, pinças e prismas. Dispositivos específicos são utilizados somente quando absolutamente necessário, para garantir a precisão ou aumentar a produtividade. Quando o volume de produção é pequeno e o produto apresenta mudanças freqüentes, dispositivos de fixação específicos tendem a aumentar os tempos de preparação e os custos de produção. Detalhes sobre a seleção de dispositivos de fixação podem ser encontrados na referência Liou e Suen (1992).

### 2.4.4 Seleção de superfícies de referência para a fabricação

Todas as cotas que aparecem em um desenho são definidas em relação a uma referência. Para o planejamento do processos as seguintes referências são de grande importância:

- referência de projeto: é um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de um outro ponto, linha ou superfície é definida em um desenho de projeto. As dimensões num desenho de projeto são chamadas de dimensões de projeto;
- referência de fabricação: é um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de uma superfície, que deve ser usinada, é definida em um desenho de fabricação. As dimensões num desenho de fabricação são chamadas de dimensões de fabricação;
- referência de posicionamento: é uma superfície da peça que define a sua posição, na direção da dimensão de fabricação, para a sua fixação na máquina-ferramenta. Assim, a posição da superfície a ser fabricada, em relação à ferramenta utilizada, depende da referência de posicionamento;
- referência de medição: é um ponto, linha ou superfície a partir do qual a posição de uma determinada superfície é medida após a usinagem;
- referência de montagem: é um ponto, linha ou superfície que determina a posição de uma peça em um conjunto, ou a posição de um subconjunto em uma máquina.

As dimensões de projeto, juntamente com suas tolerâncias, representam restrições a que cada elemento da peça está submetido. Uma dimensão de projeto é definida com base em requisitos funcionais de cada elemento. Já as dimensões de fabricação, com as respectivas tolerâncias, representam os requisitos que os processos de fabricação devem satisfazer. As dimensões de fabricação são elaboradas de tal forma que as dimensões de projeto sejam sempre garantidas. Percebe-se então, que há uma relação direta entre referências e dimensões de projeto e fabricação.

Por outro lado, a seleção de métodos de posicionamento e medição estão diretamente relacionados às dimensões de fabricação. Na verdade, as referências de projeto, posicionamento e medição são conectadas através da referência de fabricação, como ilustrado na figura 2.4.

A referência de fabricação é a entidade a partir da qual a posição da superfície que será usinada é cotada. Na operação de acabamento de uma superfície, se a referência de fabricação é a mesma da referência de projeto, então a dimensão e a tolerância de fabricação serão obtidas diretamente da dimensão e tolerância de projeto. Caso não ocorra a coincidência entre referências de fabricação e projeto, há então, a necessidade de realizar uma transferência de cotas (LOPES, 1983). A figura 2.5(a) mostra o desenho de projeto de uma peça. A figura 2.5(b) mostra o desenho de fabricação da mesma peça. A cota "C", assim como a sua tolerância, são determinadas através da transferência de cotas.

As tolerâncias das cotas recebem as denominações:

cota A =  $\partial a$

cota B =  $\partial b$

cota C =  $\partial c$

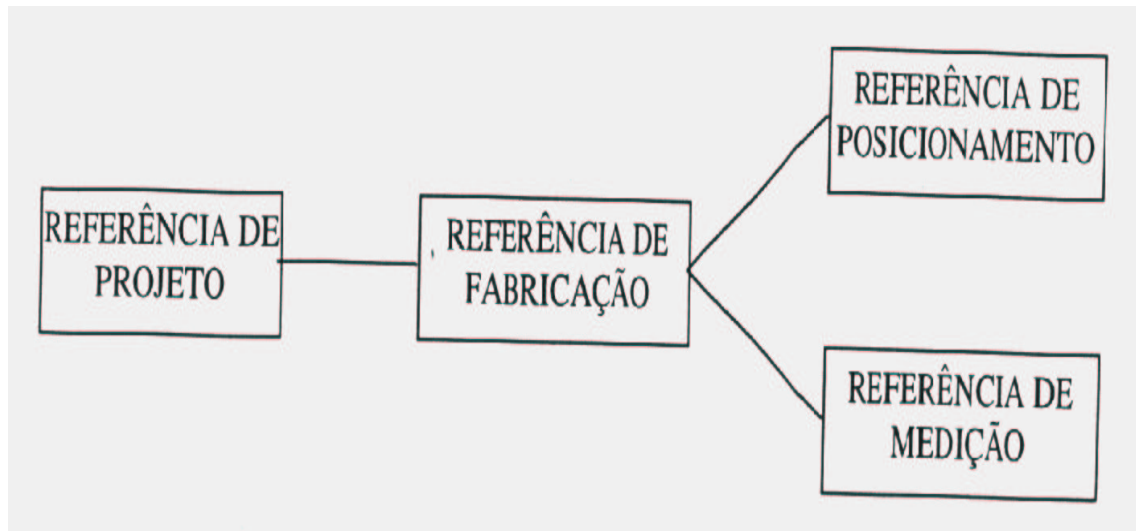


Figura 2.4: Relação entre referências de projeto, fabricação, posicionamento e medição nas superfícies de uma peça.

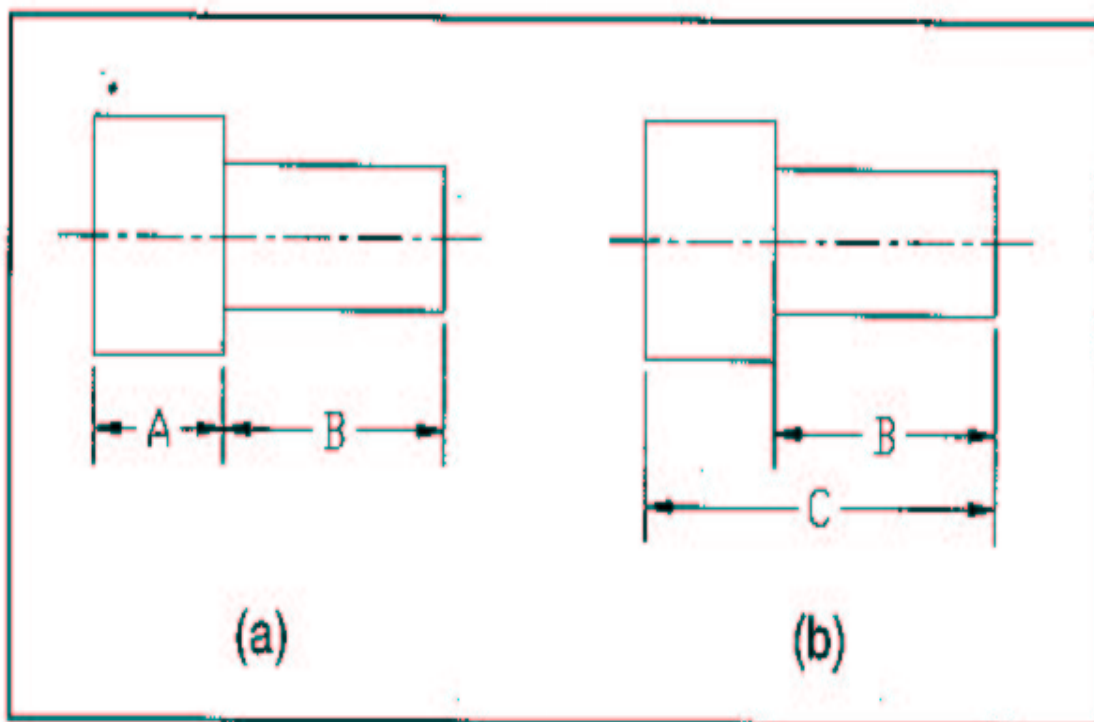


Figura 2.5: Situação onde as referências de projeto e fabricação não são as mesmas. (a) Projeto. (b) Fabricação.

A cota “A” será obtida indiretamente através da cota “C”. As dimensões de fabricação devem garantir que as dimensões de projeto sejam atendidas. O valor da cota C e da sua tolerância são então calculados (LOPES, 1983):

$$C=A+B \quad (1);$$

$$\partial c=\partial a-\partial b; \quad (2);$$

Observa-se que há uma redução na tolerância de fabricação (isto é,  $\partial c < \partial a$ ). Isto significa que pode haver a necessidade de um processo de fabricação mais preciso, que certamente terá um maior custo. O mesmo raciocínio pode ser desenvolvido com relação à coincidência entre referências de fabricação/posicionamento e fabricação/medição.

De acordo com o exposto anteriormente, percebe-se que não havendo coincidência entre referências de fabricação e referências de projeto, posicionamento e medição, resulta num estreitamento das tolerâncias, o que deve ser evitado. Este é o chamado princípio de coincidência de referências. É importante observar que nem sempre é possível seguir este princípio, já que as referências para posicionamento e medição nem sempre poderão coincidir com a referência de projeto.

Na seleção de referências para a fabricação de operações finais (de acabamento) as seguintes regras devem ser utilizadas:

- as referências de fabricação devem ser adequadas para a medição, para que possam ser diretamente inspecionadas;
- as referências de projeto devem ser utilizadas como referências para a fabricação sempre que possível, para evitar a transferência de cotas e a conseqüente redução de tolerâncias de fabricação;
- as referências de fabricação devem coincidir com as referências de posicionamento, para que não haja necessidade de transferência de cotas e a conseqüente redução de tolerâncias de fixação.

#### 2.4.5 Determinação de sobre-metals

O sobre-metal é uma camada de material que deve ser removida da peça em bruto para que se obtenha a dimensão e acabamento desejados. O sobre-metal retirado em uma dada operação é chamado de sobre-metal parcial, enquanto o sobre-metal que é retirado durante todo o processo de usinagem de uma superfície é chamado de sobre-metal total.

A cada operação em uma superfície está associada uma dimensão que deve ser obtida. O sobre-metal a ser retirado numa operação depende das tolerâncias desta operação assim como das tolerâncias da operação anterior. A figura 2.6 mostra uma superfície que tem dimensão  $L_{i+1}$  (com tolerância  $D_{i+1}$ ) que será usinada até a dimensão  $L_i$  (com tolerância  $D_i$ ). O valor nominal do sobre-metal é  $Z_i$  (com as variações  $Z_{imn}$  e  $Z_{imx}$ ).

O sobre-metal adotado para as operações executadas numa superfície influencia de forma significativa na qualidade final e na produtividade do processo. Uma camada excessiva de sobre-metal leva a um consumo exagerado de material, perda de tempo e de recursos, o que eleva os custos de produção e diminui a produtividade. Se a camada de sobre-metal é muito fina, a rugosidade superficial e a camada afetada pela operação anterior não serão completamente removidas, o que pode levar a uma qualidade superficial inadequada.

A determinação de sobre-metals deve considerar os aspectos:

1. qualidade superficial da operação anterior: todo processo de usinagem deixa, na superfície trabalhada, uma rugosidade e uma camada afetada pelo corte, que são proporcionais ao sobre-metal utilizado. Cada operação posterior visa remover a rugosidade superficial e a camada afetada, produzida pela operação anterior, ao mesmo tempo em que aumenta a precisão dimensional e qualidade superficial. A qualidade e precisão finais de uma superfície são então obtidas com a redução gradual da camada afetada pelo corte e da rugosidade superficial de cada operação. A figura 2.6 mostra as dimensões obtidas pelas operações executadas numa superfície plana externa, juntamente com os sobre-metals adotados;

2. tolerância da operação anterior: para garantir que o sobre-metal de uma operação seja suficiente para remover a rugosidade superficial e a camada afetada pelo corte anterior, deve-se ter em mente a tolerância dimensional obtida na operação anterior. A figura 2.6 mostra que o valor de  $Z_i \text{ mín} (L_{i+1} - D_{i+1} - L_i)$  e portanto depende da tolerância obtida na operação anterior ( $D_{i+1}$ ).

Com o objetivo de facilitar a determinação de sobre-metais, foram construídas tabelas de recomendações, como a tabela 2.3, que traz valores de sobre-metais a utilizar em operações de torneamento de superfícies cilíndricas externas.

Tabela 2.3: Sobre-metal que deve ser utilizado no torneamento de uma superfície cilíndrica externa.

| DIÂMETRO<br>(mm) | SOBREMÉTAL NO DIÂMETRO (mm) |             |            |             | OPERAÇÃO ANTERIOR |         |
|------------------|-----------------------------|-------------|------------|-------------|-------------------|---------|
|                  | DESBASTE                    |             | SEMI-ACAB. |             |                   |         |
|                  | COMPRIMENTO (mm)            |             |            |             |                   |         |
|                  | $\leq 200$                  | $> 200-400$ | $\leq 200$ | $> 200-400$ |                   |         |
| $\leq 10$        | 1,5                         | 1,7         | 0,8        | 1,0         |                   |         |
| $> 10-18$        | 1,5                         | 1,7         | 1,0        | 1,3         |                   |         |
| $> 18-30$        | 2,0                         | 2,2         | 1,3        | 1,3         |                   |         |
| $> 30-50$        | 2,0                         | 2,2         | 1,4        | 1,5         | IT14              | IT12-13 |
| $> 50-80$        | 2,3                         | 2,5         | 1,5        | 1,8         |                   |         |
| $> 80-120$       | 2,5                         | 2,8         | 1,5        | 1,8         |                   |         |
| $> 120-180$      | 2,5                         | 2,8         | 1,8        | 2,0         |                   |         |
| $> 180-260$      | 2,8                         | 3,0         | 2,0        | 2,3         |                   |         |
| $> 260-360$      | 3,0                         | 3,3         | 2,0        | 2,3         |                   |         |

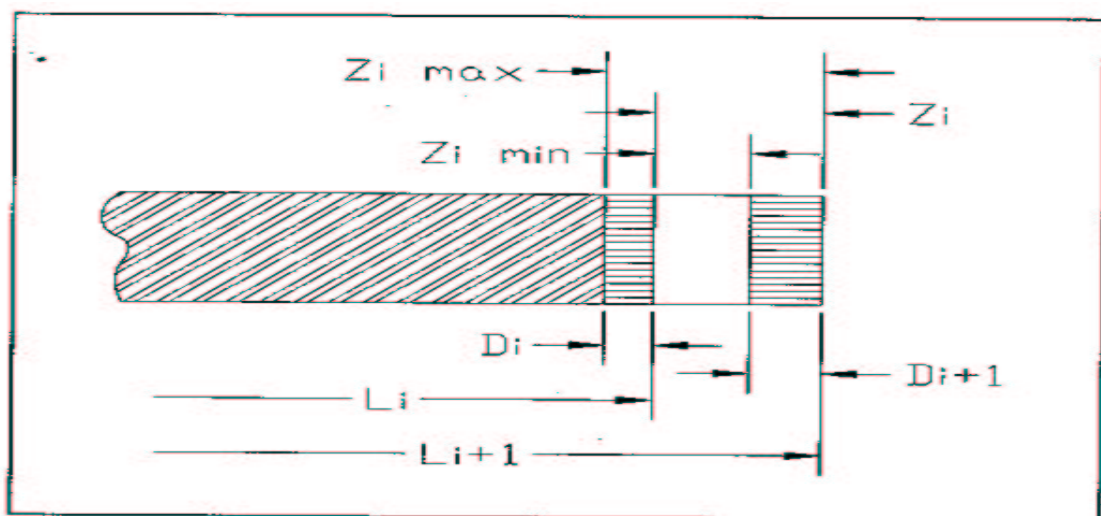


Figura 2.6: Superfície que será usinada mostrando dimensões e sobre-metal parcial com respectivas tolerâncias.

### 2.4.6 Determinação de dimensões e tolerâncias de usinagem

Cada dimensão de projeto, com as respectivas tolerâncias, é obtida através de uma série de operações de usinagem. Em cada operação executada numa superfície, busca-se obter uma dada dimensão e acabamento superficial.

A dimensão da operação final executada em uma dada superfície é determinada com base na dimensão estabelecida em projeto para aquela superfície. A dimensão de cada operação preparatória é determinada em função do sobre-metal estabelecido para a operação seguinte. Assim, as dimensões são calculadas na ordem inversa da sua execução.

A figura 2.7 mostra a relação entre as dimensões das operações e os sobre-metais adotados para cada operação executada em uma superfície plana.  $L_1$  é a dimensão da operação final (com tolerância  $D_1$ ).  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$  são as dimensões das operações preparatórias (com tolerâncias  $D_2$ ,  $D_3$  e  $D_4$  respectivamente).  $L_5$  é a dimensão da matéria-prima bruta (com tolerância  $D_5$ ). Observa-se que a dimensão de uma operação precedente é dada pela soma da dimensão e do sobre-metal da operação atual ( $L_2=L_1+Z_1$ ;  $L_3=L_2+Z_2$ ; etc).

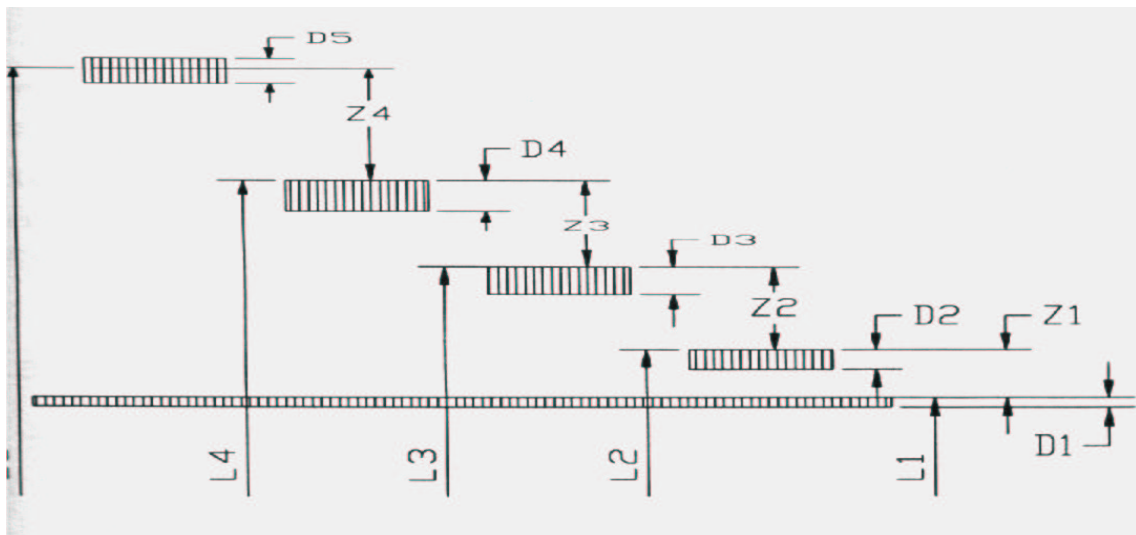


Figura 2.7: Dimensões das operações executadas numa superfície plana externa, juntamente com os sobre-metais adotados.

As tolerâncias de cada operação dependem do processo de usinagem utilizado. Normalmente a tolerância da operação final é aquela especificada em projeto. A tolerância de cada operação preparatória é determinada em função da precisão que pode ser obtida no processo escolhido para a sua execução. As tolerâncias escolhidas para um processo são de grande importância, pois, se forem muito estreitas, métodos precisos deverão ser utilizados, se forem muito largas, ocorrerá uma grande variação no sobre-metal da operação seguinte, o que pode impedir que se consiga a precisão e qualidade superficiais desejados.

### 2.4.7 Seleção de condições de corte

As condições de corte utilizadas numa operação influenciam de forma bastante significativa na precisão dimensional e na qualidade superficial obtidas, assim como na vida da ferramenta e produtividade de um processo.

A seleção de condições de corte envolve a determinação de três parâmetros: profundidade, avanço e velocidade de corte. O primeiro passo é a determinação da profundidade de corte ( $a_p$ ). Se é possível a execução da operação em um único passe, então a profundidade de corte é determinada em função do sobre-metal. Em operações de desbaste, a profundidade de corte é função da potência da máquina-ferramenta, do comprimento da aresta de corte, da rigidez da peça, do método de

fixação, etc. Desta forma, podem ser necessários vários passes de usinagem para a remoção do sobre-metal, com profundidades de corte menores. A profundidade de corte está sempre associada à natureza da operação executada. Operações de semi-acabamento e acabamento geralmente são realizadas em um único passe devido ao pequeno sobre-metal utilizado.

Uma vez que a profundidade de corte tenha sido determinada, deve-se selecionar um avanço ( $f$ ) adequado. O avanço utilizado depende da capacidade da máquina-ferramenta (para operações de desbaste) e da qualidade superficial desejada (para operações de semi-acabamento e acabamento).

Com os valores de  $ap$  e  $f$  determinados segue-se ao cálculo da velocidade de corte ( $vc$ ). Aqui, de acordo com a teoria da economia da usinagem (STEMMER, 1993), pode-se determinar a velocidade mais adequada à máxima produção ou ao mínimo custo.

Como o objetivo de utilizar condições ótimas de corte, diferentes metodologias são utilizadas. HUANG (1988) apresenta uma metodologia de otimização baseada no diagrama  $ap \times f$ . SILVA (1994) apresenta uma proposta de otimização de condições de corte baseada no ajuste dos coeficientes da equação expandida de Taylor, a partir de dados experimentais, para cada par material-ferramenta.

#### 2.4.8 Estabelecimento de tempos padrão

Os tempos padrão estabelecidos para as operações são a base para o planejamento da produção, levantamento de custos, etc. O tempo padrão é o tempo necessário para a execução de uma operação, sob condições bem determinadas.

#### 2.4.9 Documentação do plano de processo

Depois que o conjunto de processos de fabricação foi completamente planejado, deve ser devidamente documentado. Aqui duas formas de documentos são elaboradas: o roteamento e o plano de operações. Estes documentos são a base para a organização do chão-de-fábrica assim como para a realização de cada operação.

O roteamento mostra o processo de fabricação da peça como um todo. Contém as operações do processo, equipamentos e ferramentas que devem ser utilizados em cada operação e tempos estimados para cada operação. A figura 2.8 mostra o esboço de um roteamento de processo.

O plano de operações é um documento detalhado para cada operação, que informa ao operador como cada operação deve ser executada. Contém informações de como a peça deve ser fixada, seqüência de operações elementares, equipamento e ferramentas a utilizar, condições de corte que devem ser adotadas, etc. Para que a operação seja claramente entendida, é comum colocar um desenho da peça, no plano de operações, ilustrando a superfície que deve ser usinada, assim como as dimensões e tolerâncias que devem ser alcançadas. A figura 2.9 mostram o esboço de um plano de operações.

### 2.5 Plano de Processo por Peça x Plano por Lote

Quando se faz um plano de processo para uma determinada peça, uma série de operações são estabelecidas, de forma que seja possível fabricar a peça a partir de uma dada matéria-prima. Tome-se como exemplo, a fabricação de um anel a partir de uma barra (figura 2.10).

Uma das operações que devem ser realizadas é a furação da barra, até que o diâmetro interno do anel seja atingido. Vários detalhes do processo referentes à operação de furação, como a escolha de ferramentas, depende de dois parâmetros básicos que devem ser definidos: diâmetro e profundidade do furo.

Quando se pensa na produção de uma única peça, o plano de processos por peça irá determinar uma operação de furação com profundidade igual ao comprimento da peça (figura 2.11a). Contudo, quando se pensa na execução de um lote de peças, pode ser bem mais interessante a execução de um furo mais profundo, de forma que o diâmetro interno de várias peças seja garantido em uma

|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|-----------|------------------------------|---------|-----------------|------------------|---------|-------------------------|----------------|
| EMPRESA   | ROTEAMENTO<br>DO<br>PROCESSO |         | No. DO PRODUTO: |                  |         | PAGINA:<br>DE<br>TOTAL: |                |
|           |                              |         | No DA PEÇA:     |                  |         |                         |                |
|           |                              |         | DESCRIÇÃO:      |                  |         |                         |                |
| MATERIAL: |                              |         |                 | PEÇAS POR METRO: |         | QUANTIDADE:             |                |
| OP No.    | NOME DA<br>OPERAÇÃO          | MAQUINA | FERRAMENT<br>A  | FIXAÇÃO          | MEDIÇÃO | TEMPO<br>PADRÃO         | OBSERVAÇÃ<br>O |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         |                 |                  |         |                         |                |
|           |                              |         | PROCESSISTA     |                  |         | APROVADO                |                |
|           |                              |         | DATA            |                  |         | DATA                    |                |
| ALTERAÇÃO | APROVADO                     | DATA    |                 |                  |         |                         |                |

Figura 2.8: Esboço de um roteamento de processo.

| EMPRESA  | PLANO<br>DE<br>OPERAÇÃO | No. DO PRODUTO: |             |         | PAGINA:<br>DE<br>TOTAL: |                 |                |
|--|-------------------------|-----------------|-------------|---------|-------------------------|-----------------|----------------|
|  |                         | No DA PEÇA:     |             |         |                         |                 |                |
|  |                         | DESCRIÇÃO:      |             |         |                         |                 |                |
| OP No.   | NOME DA OPERAÇÃO        | MATERIAL        | DUREZA      | MAQUINA | FIXAÇÃO                 | TEMPO<br>PADRÃO |                |
|  |                         |                 |             |         |                         |                 |                |
|  |                         |                 |             |         |                         |                 |                |
| <p>DESENHO DA PEÇA<br/>ILUSTRANDO AS DIMENSÕES DA SUPERFÍCIE<br/>QUE DEVE SER USINADA, ASSIM COMO<br/>A FORMA DE FIXAÇÃO</p> |                         |                 |             |         |                         |                 |                |
| Seq. No.   | OP.<br>ELEMENT.         | FERRAMENT<br>A  | MEDIÇÃO     | N (RPM) | F (MM/REV)              | AP (MM)         | OBSERVAÇÃ<br>O |
|  |                         |                 |             |         |                         |                 |                |
|  |                         |                 |             |         |                         |                 |                |
|  |                         |                 | PROCESSISTA |         |                         | APROVADO        |                |
|  |                         |                 | DATA        |         |                         | DATA            |                |
| ALTERAÇÃO  | APROVADO                | DATA            |             |         |                         |                 |                |

Figura 2.9: Esboço de um plano de operações.



única operação de furação (figura 2.11b). Esta operação estaria presente num plano de processos por lote.

O plano de processos de um dado lote é obtido através de algumas modificações feitas no plano de processos da peça. É importante observar que pequenas modificações nas operações necessárias podem levar a uma escolha bem diferente de ferramentas, máquinas, etc.

## 2.6 Plano de Processo *on-line* x *off-line*

Dependendo do nível de integração entre as atividades do ciclo produtivo de uma dada empresa, algumas atividades podem ser realizadas em tempo real. Quando tal situação é encontrada na geração de planos de processo, diz-se que o plano é *on-line*. Isto porque todo o plano é gerado em função de recursos disponíveis no momento. Caso os planos de processo sejam gerados com uma certa antecedência, não haverá como garantir que os recursos selecionados realmente estarão

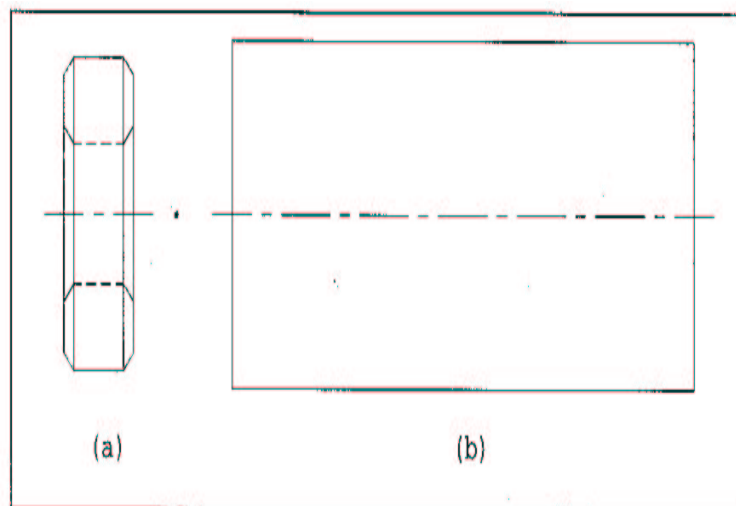


Figura 2.10: (a) Anel a ser fabricado. (b) Barra utilizada como matéria-prima.

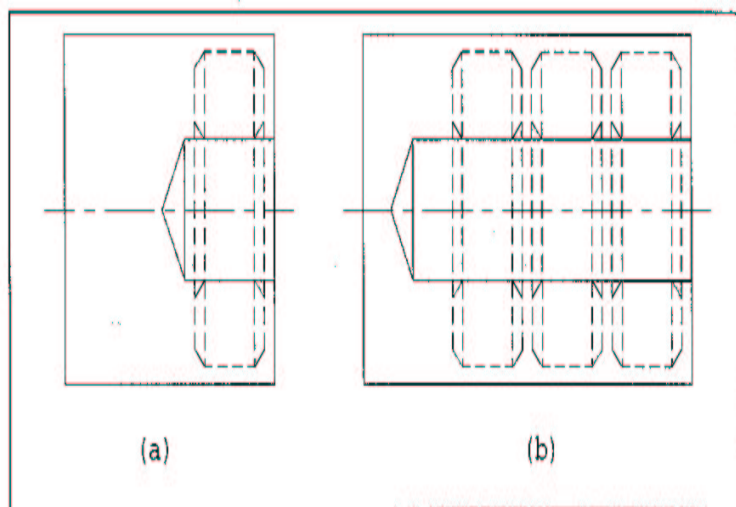


Figura 2.11: (a) Furação para uma única peça. (b) Furação para várias peças de uma só vez.

disponíveis no momento da execução das operações. A este tipo de planejamento do processos, dá-se o nome de plano off-line. Neste caso, é comum a seleção de recursos alternativos, que poderão ser utilizados na execução das operações, caso os recursos principais não estejam disponíveis.

Para que seja possível a utilização de sistemas CAPP para a geração de planos *on-line*, a abordagem de sistemas generativos se torna essencial, assim como o compartilhamento de dados com um sistema de planejamento da produção (MRP).

## Capítulo 3

# Estratégias nas Atividades de Planejamento do Processo

Neste capítulo será apresentada uma compilação das principais estratégias e técnicas utilizadas na resolução dos principais problemas relacionados as atividades/funções de planejamento do processo apresentados no capítulo anterior nos tópicos relacionados às etapas dos estágios de planejamento do processo: roteamento e projeto. Maiores detalhes dos métodos, algoritmos, regras, fórmulas e heurística poderão ser obtidos em Hang & Li (1991), Halevi & Wein (1995), Halevi (1999), Rezende (1996), Porchet & Kiritsis (1996), Ferreira & Wysk (2001), Sandvik (1994), SME (1991), Rezende (1996).

### 3.1 Seleção de Processos de Usinagem, Ferramentas e Parâmetros de Corte - Abordagem *Top-Down*

Uma peça é composta por um determinado número de *features*<sup>1</sup> que é produzida por uma sucessão de operações de usinagem de diferentes tipos. A figura 3.1 apresenta o projeto de uma peça mecânica constituída por nove *features* de projeto a serem usinadas.

A tabela 3.1 apresenta uma descrição dos processos e ferramentas necessários para produzir as diferentes *features* de acordo com os requisitos de precisão dimensional e acabamento superficial definidos.

Para cada *feature*, por exemplo *feature* (2) duas possibilidades de operações poderão ocorrer (desbaste e/ou acabamento) . A escolha final dependerá da capacidade da máquina-ferramenta disponível. Para a *feature* (4) três operações (desbaste, semi-acabamento e acabamento) serão necessários para atingir os requisitos de qualidade especificados para a peça. A seleção do número de ferramentas, operações e passes de usinagem é feito de acordo com as considerações de tolerância (análise de tolerância) para cada *feature* de projeto a ser usinada. Este detalhamento é feito no projeto das operações de usinagem que será descrito na próxima seção. Esta abordagem *top-down* tem como objetivo apresentar um método que pode ser implementado computacionalmente a fim de agrupar as operações elementares em operações (*jobs*), realizar o seqüenciamento destas operações elementares grupadas<sup>2</sup> de acordo com seu relacionamento de precedência (anteriores). Este método de determinação da seqüência de operações de usinagem foi desenvolvido por Sundaram (1986) e também, descrito por Halevi & Weill (1995) que apresenta uma pequena diferença na resolução da matriz de relacionamento de precedência.

Esta metodologia estabelece um procedimento sistemático para seleção da seqüência de operações de usinagem. As operações elementares de usinagem podem ser grupadas em uma seqüência

---

<sup>1</sup> *Features* são elementos físicos de uma peça que têm um significado específico para alguma função de engenharia (HOUNTEN, 1991). O Capítulo 4 apresenta um detalhamento sobre *features*.

<sup>2</sup> Operações elementares grupadas denominadas a partir de agora simplesmente de *operações*.

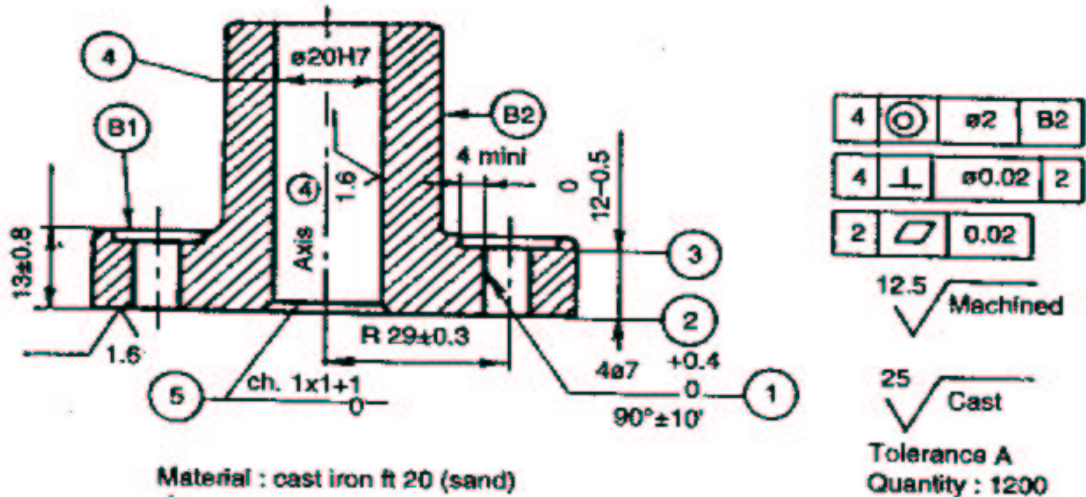


Figura 3.1: Peça exemplo (HALEVI e WEILL, 1995; SUNDARAM, 1986)

Tabela 3.1: Passes e Ferramentas especificados para cada operação

| Feature to be machined | Design specifications  | Passes and tools                    |               |                          | Number of tools |
|------------------------|--|-------------------------------------|---------------|--------------------------|-----------------|
|                        |  | Roughing                            | 1/2 finishing | Finishing                |                 |
| (1)                    | $\varnothing 7_0^{+0.4}$ ; $R_s 12.5$ $29 \pm 0.3$                   |                                     |               | Drill                    | 1               |
| (2)                    | $13 \pm 0.8$ ; $R_s 1.6$ planeity 0.02                               | Eventually miller or surfacing tool |               | Miller or surfacing tool | 1 or 2          |
| (3)                    | $12_{-0.5}^0$ ; $R_s 12.5$ 4 mini.                                   |                                     |               | Countersinking tool      | 1               |
| (4)                    | $\varnothing 20H7 - R_s 1.6$<br>$\odot \varnothing 2$ ; $\perp 0.02$ | Drill                               | Tool on bar   | Reamer                   | 3               |
| (5)                    | Chamfer: $1 \times 1_0^{+1}$   |                                     |               | Tool for chamfering      | 1               |

e o grupo de operações elementares pode ser processado em uma única máquina. A partir da especificação de operações de usinagem é montado uma tabela de relacionamento de precedência de operações baseada nos seguintes fatores (Tabela 3.2):

- Tolerância Dimensional;
- Tolerância Geométrica (acabamento superficial, tolerância de forma e posição);
- Considerações Tecnológicas (incluir desbaste antes de acabamento, por exemplo);
- Aspectos Econômicos (incluir semi-acabamento, por exemplo).

O trabalho de Sundaram (1986) detalha o método e apresenta a solução através de manipulação de matrizes, o que é facilmente implementado em um computador. A abordagem da solução proposta por Halevi & Weill (1995) não permite uma implementação computacional sendo mais adequada como demonstração de uma solução didática.

Tabela 3.2: Tabela das Anteriores.

| Operations                                | Anteriorities |              |                               |  |
|---|---------------|--------------|-------------------------------|--|
|   | Dimensional   | Geometr.     | Technol.                      | Economical   |
| 1F<br>2R                                  | 4F            | 2F           | orthogonal                    | 4 $\frac{1}{2}$ F economy of machining   |
| 2F<br>3F<br>4R<br>4 $\frac{1}{2}$ F<br>4F | B1<br>2F      | 1F           | 2R                            |  |
| 5F  | 2F            | B2 ⊙<br>2F ⊥ | 4R<br>4 $\frac{1}{2}$ F<br>5F | 2F, protection of tool<br>5F, no burrs<br>4 $\frac{1}{2}$ F economy of machining |

F = finish. R = rough.

Source: Karr, J., *Methodes et Analyses de Fabrication Mecanique*, published by Dunod, Bordas, Paris, 1979.

## 3.2 Determinação do Tipo de Operação

Segundo Halevi & Weill (1995) muito esforço tem sido desenvolvido nos últimos anos para estabelecer teorias e algoritmos para a completa otimização do processo de fabricação com remoção de material. Entretanto a maioria dos esforços concentram-se nos parâmetros tecnológicos de usinagem, em especial na velocidade de corte. Caso a operação a ser executada seja superflua nenhum ganho será obtido com a otimização da velocidade de corte que está diretamente relacionada com o tempo de usinagem.

As operações necessárias e sua seqüência devem ser determinadas antes da escolha das condições de usinagem e da máquina a ser utilizada, caso haja opções de máquinas. A seguir são apresentados alguns métodos para determinar os tipos de operações necessárias para fabricação da peça.

### 3.2.1 Capacidade do processo e seus limites

A seleção da operação deve ser baseado na capacidade e nas condições de limite do processo. A profundidade de corte é um dos parâmetros que mais influenciam na tomada desta decisão. A estratégia de limites de contorno é baseado no conceito da existência de restrições técnicas e

considerações econômicas na seleção das operações de corte ótimas. O método proposto por Halevi & Weill (1995) estabelece um conjunto de restrições técnicas como limites de contorno, e então, levando em consideração aspectos econômicos, seleciona as condições de trabalho dentro destes limites.

São levadas em consideração as seguintes restrições:

- restrições tecnológicas baseadas na teoria de corte;
- restrições da peça;
- restrições de material;
- restrições de máquinas-ferramenta;
- restrições de ferramentas;
- restrições do usuário.

Estas restrições são usadas para estabelecer os limites da profundidade de corte, avanço e velocidade de corte. Uma descrição da influência destas restrições sobre os parâmetros de corte é apresentado em Halevi e Weill (1995). Com a utilização deste método é possível determinar as condições de contorno (limites máximo e mínimo) para os parâmetros de corte levando em conta todas as restrições apresentadas.

As restrições que determinarão as condições de contorno (limites) são expressas através de fórmula e tabelas como por exemplo:

- acabamento superficial como função da profundidade de corte e avanço;
- força de corte como função da profundidade de corte e avanço;
- limite da profundidade de corte como função da dureza do material e acabamento superficial;
- profundidade de corte como função do avanço;
- profundidade de corte como função de uma operação elementar a ser selecionada, entre outros.

### **3.2.2 Algoritmo para seleção das operações de corte x Tabelas de roteamento**

Este algoritmo desenvolvido por Halevi e Weiss (1995) tem por finalidade otimizar a definição das operações de usinagem. Baseia-se no axioma onde a otimização é buscada através da minimização dos número de passes de usinagem definindo os maiores valores possíveis das condições de usinagem (avanço e profundidade), dando preferência às estratégias de otimização bem conhecidas baseadas nos limites de contorno calculados e tabelados.

A partir dos limites da profundidade de corte calculados em relação as diversas restrições que são levadas em consideração determina-se a quantidade de passes a ser efetuada escolhendo os parâmetros de corte para cada operação de usinagem, avanço e profundidade de corte. A velocidade de corte é determinada por outro método. Cabe destacar que a utilização deste método é mais genérico pois ainda não se escolheu a ferramenta de corte a ser utilizada bem como a máquina-ferramenta. Este método determina inicialmente o sistema e dispositivo de fixação da peça, a seguir determina as operações elementares (número de passes e condições de usinagem) e finalmente faz um grupamento das operações elementares em operações (jobs) utilizando a matriz das anteriores. Após a determinação das operações define-se a velocidade de corte, escolhe-se a máquina através da Matriz de Halevi e finalmente seleciona-se as ferramentas de corte. Neste método parte-se das operações de usinagem, condições tecnológicas de corte e por último define-se as máquinas e ferramentas, minimizando as restrições que se impõe a cada tomada de decisão. Desta forma

as restrições impostas pelas várias decisões tomadas ao longo das etapas do planejamento do processo são minimizadas. Uma característica deste método por buscar uma otimização na tomada de decisão e minimização das restrições na execução do planejamento do processo é a geração de planos de processos genéricos e não customizados para operações elementares associados à ferramenta específica.

Outra abordagem muito popular (FERREIRA, 1996) é a utilização de tabelas que já apresentam roteamentos típicos de usinagem para superfícies cilíndricas externas, internas e planas. Exemplos destes tipos de tabelas podem ser obtidos em manuais. Após a seleção dos processos finais de usinagem e roteamentos de todas as superfícies (críticas e menos críticas), faz-se uma análise considerando-se as *features* inter-relacionadas por tolerâncias. Um exemplo de roteamento de usinagem para uma determinada superfície poderia ser: torneamento (desbaste) -> torneamento (semi-acabamento) -> retificação (desbaste) -> retificação (acabamento) -> super-acabamento (Tolerância IT de 3-5 e Rugosidade de 0,008-0,16  $\mu\text{m}$ ). Após a sub-divisão da rota de processo em estágios<sup>3</sup> pode-se utilizar o conceito de sobre-material para definir a quantidade de passes a ser efetuado em cada estágio das operações de usinagem. Este método é muito utilizado e possibilita a escolha de rotas de usinagem bastante exequível e racional apesar de não usar nenhuma forma de otimização. Pode-se utilizar os dois métodos em conjunto visando a otimização.

### 3.2.3 Determinação de sobre-materiais de usinagem

Outra estratégia que pode ser utilizada é baseada no conceito de sobre-material de usinagem<sup>4</sup> que é apresentado em Wang e Li (1991) e Ferreira (1996). A quantidade de sobre-material é a diferença entre as cotas de fabricação obtidas nas operações atual e anterior. O sobre-material total (incluindo todas as operações) é igual à soma dos sobre-materiais referentes a cada operação, desde a matéria-prima até a peça na forma final.

Existem diferentes métodos para a determinação de sobre-materiais (FERREIRA, 1996):

1. Cálculo: pouco usado devido à ausência de dados experimentais.
2. Estimativa baseada na experiência: normalmente pouco eficiente.
3. Tabelas de sobre-materiais: dados disponíveis de manuais normalmente compilados de dados de chão-de-fábrica e experimentos. Esta é a abordagem mais utilizada na determinação de sobre-material. Em Ferreira (1996) são apresentadas uma compilação de várias tabelas de sobre-material para diversas superfícies e processos.

Cada cota e tolerância de projeto é obtida através de uma série de operações de usinagem. Em cada operação, a superfície é usinada até que se atinja uma certa cota e precisão de fabricação. A cota e tolerância de fabricação devem ser indicadas no plano de operações. A determinação das cotas de fabricação de outras operações de usinagem relaciona-se com os sobre-materiais de usinagem. Os sobre-materiais são determinados em ordem inversa, isto é, da peça acabada até a matéria prima.

Ao calcular-se as cotas de fabricação, deve-se diferenciar as superfícies externas das internas, e também as superfícies planas das cilíndricas. É necessário determinar as tolerâncias de fabricação para cada cota de fabricação e que dependerá do processo de usinagem empregado. Todas as tolerâncias de fabricação nas operações intermediárias são determinadas de acordo com a precisão de usinagem que pode ser obtida economicamente.

### 3.2.4 Determinação de condições de usinagem e tempos padrão

As condições de usinagem podem ser obtidas de *handbooks* ou catálogos de fabricantes de ferramentas, ou através do método *seqüencial*. No caso da utilização de *handbooks* ou catálogos de

<sup>3</sup>Em função da natureza das operações podemos ter três tipos de estágios: desbaste, semi-acabamento e acabamento.

<sup>4</sup>Sobre-material de usinagem é uma camada de material que deve ser removida da superfície da peça para que a precisão e a qualidade da superfície sejam obtidas.

fabricantes de ferramentas faz-se a seleção das condições de corte para uma dada combinação de materiais de peça e ferramenta, bem como, da geometria da ferramenta (FERREIRA, 1996).

O método seqüencial consiste na determinação, numa ordem definida, das condições de corte. Primeiramente, a profundidade de corte é estabelecida (similar Halevi & Weill (1995)). Se o sobre-material puder ser removido num único passe, a profundidade de corte será igual ao sobre-material. A profundidade de corte, em operações de desbaste, é restringida pela potência da máquina, pela rigidez da peça, pelo método de fixação, entre outros, como discutido no capítulo 2. Algumas vezes, pode ser necessário remover o sobre-material em vários passes, reduzindo-se portanto a profundidade de corte. No caso de operações de semi-acabamento e acabamento, a usinagem é feita em geral num único passe.

A próxima variável a ser selecionada é o avanço, que depende da capacidade da máquina para executar operações de desbaste, e também do acabamento superficial para as operações de acabamento e semi-acabamento. Finalmente seleciona-se a velocidade de corte através da equação expandida de Taylor advinda da teoria da usinagem dos metais. Outra opção é selecionar de catálogos de fabricantes em função da ferramenta. Pode-se escolher a velocidade de corte otimizada em função dos métodos de menor custo de usinagem ou menor tempo de usinagem.

A seguir determina-se a potência necessária para a usinagem e compara-se com potência disponível na máquina, principalmente para operações de desbaste.

Verifica-se também a necessidade de se utilizar fluido de corte a fim de reduzir as forças (lubrificação) e temperatura (refrigeração) de corte, bem como melhorar a qualidade superficial.

A fase final do planejamento do processo consiste em estabelecer o tempo padrão para cada operação. Os tempos padrões num plano de processo fornecem os dados iniciais para o escalonamento da produção, escalonamento de pessoal e cálculo de custos. O tempo padrão é o tempo necessário para executar uma tarefa bem definida (p.ex. uma operação) sob certas condições. Um tempo padrão é composto pelo tempo de *setup*, tempo de processamento, tempo de manuseio, tempo de serviço e tempo de compensação. Em Ferreira (1996) são apresentadas tabelas e fórmulas para o cálculo dos diversos componentes do tempo padrão, em especial os modelos de tempo para as principais operações de usinagem normalmente utilizadas e que dependem das condições de usinagem definidas para a operação.

### 3.3 Posicionamento de uma Peça

O propósito do posicionamento de uma peça consiste em restringi-lá numa posição definida e correta na mesa da máquina, cantoneira ou *pallet*<sup>5</sup> antes dela ser fixada (Ferreira, 1996). Em uma operação de usinagem, a peça no fixador deve ser restringida totalmente, ou seja, restringir todos ou alguns dos seus seis graus-de-liberdade (três translações e três rotações). Na prática, o número de graus-de-liberdade que podem ser restringidos através do contato de uma superfície de um fixador depende também da forma da superfície de apoio do fixador.

Algumas vezes o posicionamento redundante é utilizado, visando o aumento da rigidez e/ou estabilidade da peça, como por exemplo no torneamento onde uma extremidade da peça é fixada numa placa de três castanhas e a outra em uma contra-ponta. Neste caso deseja-se uma elevada precisão posicional entre as referências de apoio (a concentricidade entre o cilindro externo e o furo de centro).

Os princípios de seleção de referências de apoio são:

1. Uma referência de apoio deve possibilitar que a peça fique numa posição precisa, e permanecer estável durante a usinagem. Deve-se assim selecionar superfícies simples (planos, cilindros externos e internos) como referências de apoio. As áreas das superfícies de referência de apoio devem ser grandes o suficiente para assegurar a estabilidade da peça durante a usinagem. Esta área deve ser capaz de acomodar o número de graus-de-liberdade que ela restringe. Uma referência de apoio deve possuir uma boa precisão e acabamento superficial.

---

<sup>5</sup>Deste ponto em diante, o componente sobre o qual a peça é sujeitada será denominado de *fixador* (do inglês *workholder*). Este componente pode ser a própria mesa da máquina, uma cantoneira ou um *pallet*.



Finalmente, as posições relativas entre a referência e a superfície a ser usinada devem ser adequadas para uma posição suficientemente rígida, para que uma distorção excessiva não ocorra em função das forças de fixação e de corte.

2. Uma referência de apoio selecionada adequadamente propicia uma condição favorável para satisfazer o princípio de coincidência de referências (PCR). Deve-se buscar a coincidência entre as referências de apoio e fabricação, bem como com as referências de projeto e medição.

A coincidência entre as referências de fabricação e de projeto depende da escolha de uma referência de projeto que seja apropriada para apoio e medição.

A precisão dimensional entre superfícies pode ser alcançada através de um dos seguintes métodos:

1. Usinagem na mesma fixação da peça: permite que as superfícies usinadas sejam afetadas somente pela precisão da máquina e do *setup*;
2. Duas superfícies sendo referências uma em relação a outra: menor precisão que o método anterior devido a existência de um erro de posição. Este método deve ser utilizado quando duas superfícies não puderem ser usinadas numa única fixação;
3. Usando-se a mesma referência de apoio: não resulta numa alta precisão posicional, porque existirá erros de posição em cada fixação da peça, e também haverá inconsistência entre as referências de fabricação e de apoio.
4. Usando-se referências de apoio diferentes: a precisão posicional é afetada por erros de posição, inconsistência entre as referências de fabricação e de apoio em cada operação, tolerância da cota entre as duas referências de apoio. Este é o pior método e só deve ser usado quando não for factível utilizar os métodos anteriores.

### 3.3.1 Fixação em um torno

Existem muitos métodos de fixação de peças simétricas em um torno. Halevi & Weill (1995) apresentam algumas regras para selecionar o tipo de fixação mais econômica para operações de torneamento, descritos a seguir.

#### Características de placas com três castanhas

- Forma do segmento: segmentos cilíndricos;
- Comprimento do segmento: comprimento de contato entre a castanha e peça deve ser de pelo menos 1,2 do segmento do diâmetro. Em qualquer caso o menor comprimento de contato não deve ser menor do que 5 mm;
- Diâmetro da peça: dependerá das especificações da placa do torno;
- Tipos de castanhas: as castanhas exercem uma tensão de compressão sobre a peças. Estas forças devem contra-balancear as componentes das forças de usinagem na direção tangencial e radial. As castanhas podem ser do tipo *Dura* para operações de desbaste (castanha com mordente de perfil serrilhado ou em losângulo, maior coeficiente de atrito) ou do tipo *Mole* para operações de acabamento (castanha com mordente de perfil liso/usinado, menor coeficiente de atrito).

#### Placa de três castanhas sem contra-ponta

- É um dispositivo mais econômico;
- As três castanhas garantem a concentricidade da peça em relação a árvore/fuso da máquina;
- Peça considerada como uma viga engastada;
- Não deve ser usada quando a razão entre comprimento e diâmetro da peça é maior que 3,5.

**Placa de três castanhas com contra-ponta**

- É considerado uma viga engastada de um lado e do outro lado uma viga apoiada;
- Permite um maior carregamento;
- Desvantagem: a peça necessita de um furo de centro para apoio da contra-ponta, logo o custo de usinagem e o tempo de processamento é maior;
- Pode-se trabalhar com avanços e profundidade de corte maiores diminuindo o tempo de usinagem;
- Regra: deve ser utilizado quando a razão entre comprimento e diâmetro da peça é maior que 2,5
- A razão entre comprimento e diâmetro da peça pode chegar até 6.
- Deve ser usado se a razão entre comprimento do segmento de contato e o diâmetro da peça for menor que 0,8;
- Deve ser usado se o comprimento do segmento de contato peça e castanha for inferior a 5 mm.

**Placa com pinça**

- Similar a placa com três castanha entretanto é mais precisa.

**Placa com quatro castanhas independentes**

- Usado em peças não simétricas que devem ter um determinado ajuste para uma dadalinha de centro da peça;
- Maior tempo de *setup* e melhor precisão.

**Placa de face (três tipos podem ser empregadas)**

- Fixação com três castanhas com furo passante;
- Fixação com mandril;
- Fixação entre centros.

## Capítulo 4

# O Uso de Computadores em Projeto e Manufatura

Atualmente, ferramentas computacionais de apoio à filosofia de Engenharia Simultânea (CE) não estão disponíveis. Alguns sistemas acadêmicos que integram várias ferramentas dedicadas em uma arquitetura cooperativa foram ou estão em desenvolvimento (CUTKOSKY, 1993). Porém, ainda será necessário muito esforço de pesquisa para o desenvolvimento de ferramentas computacionais de apoio integral a filosofia CE. Não obstante, em vários campos importantes, muito progresso foi feito na utilização do computador para resolução de atividades específicas. Por exemplo, várias ferramentas específicas foram desenvolvidas em Projeto para Montagem (DFA) e de análise. Porém, freqüentemente estes sistemas não cooperam. Neste capítulo serão apresentados os aspectos do uso de computadores em projeto, CAD. O uso de computadores no planejamento do processo, CAPP, como uma fase de intermediária entre CAD e CAM, e a seguir o uso de computadores na manufatura, CAM. Os aspectos e perspectivas futuras de integração entre as funções cobertas pelas ferramentas computacionais em um contexto de Engenharia Simultânea é apresentado.

### 4.1 CAD

Projeto Auxiliado por Computado (CAD) às vezes é usado como sinônimo de Desenho Auxiliado por Computador, indicando que CAD não é nada além de uma extensão do tradicional desenho em prancheta. Antes de 1960, quase não haviam aplicações de computador para projeto (ou manufatura). Entre 1960 e 1970 a maioria dos programas computacionais em engenharia eram limitados aos programas de cálculo que eram processados em *batch*. Assim, não havia nenhuma interação entre o usuário e o programa. Um dos primeiros (acadêmico) sistemas interativos de apoio ao projeto (esboço 2D) foi o sistema de Sketchpad desenvolvido por Sutherland (1963). Este sistema estava a frente de seu tempo.

Depois de 1970, com o advento de terminais gráficos, foi possível trabalhar interativamente. Porém, o *hardware* disponível era caro, restringindo o uso destes sistemas a um número limitado de companhias, aplicações e pessoas.

A partir de 1980, com o rápido desenvolvimentos no campo de micro-processadores e módulos de memória aliado ao avanço de computadores mais baratos e mais poderosos; *workstations* e computadores pessoais ficaram amplamente disponíveis a preços razoáveis. Este desenvolvimento possibilitou a introdução de CAD em uma escala maior. No meio da década de 80, sistemas de Engenharia Baseados no Conhecimento para projeto foram desenvolvidos, como o sistema ICAD® (WAGNER, 1990). Estes sistemas empregam tecnologia de Inteligência Artificial (AI) para representar o conhecimento especialista de projeto manufatura. A vantagem destes sistemas em relação às abordagens tradicionais está associada a maior velocidade de desenvolvimento de projetos semelhantes, com diferentes especificações e geometria. Também, o termo ICAD, CAD Inteligente, não deve ser confundido com o sistema ICAD®, que foi desenvolvido nos anos oitenta. Porém, os

sistemas de CAD verdadeiramente inteligentes ainda são um assunto de cunho acadêmico.

A representação no computador do objeto de projeto, ou modelo de produto, também foi desenvolvida gradualmente com o passar do tempo. No princípio o “D” de CAD estava querendo dizer realmente desenho; apenas modelo de produto 2D, desenhos técnicos, podiam ser feitos. O modelo de produto era uma coleção destes itens, representando um desenho técnico 2D convencional. No meio da década de setenta os primeiros sistemas 3D de CAD foram lançados. Para prover modelos 3D, *wire-frames* foram desenvolvidos. Porém, *wire-frames* podiam modelar só objetos 2.5 D (prismático). Para modelar superfícies mais complexas, modeladores de superfície foram desenvolvidos. Sistemas CAD baseados em superfície possibilitaram a modelagem de superfícies complexas que eram importante na indústria automotiva e aeroespacial. Modeladores de superfície usam freqüentemente *B-splines* ou NURBS (*B-splines racional non-uniforme*) como base de representação de superfícies. Usando estas representações, curvas e superfícies são aproximadas por funções parametrizadas que podem ser manipuladas movendo-se pontos de controle.

Com modelagem *wire-frames* e modelagem de superfície não se consegue desenvolver modelos de produto sem ambigüidades para serem interpretados e analisados. Por este motivo desenvolveu-se outra técnica de modelagem denominada de modelagem de sólido. Normalmente em modelagem de sólido utiliza-se dois esquemas de representação: *boundary representation* (B-rep) e *Constructive Solid Geometry* (CSG). Desta forma os três tipos de representação geométrica que são mais utilizados nos modeladores geométricos através das representações na forma são: modelos em *wire-frame*, modelos de superfície e modelos sólidos. Modelos em *wire-frame* contêm apenas informações sobre vértices e arestas do objeto e não se prestam para transformação em objetos sólidos. De forma similar modelos de superfície contêm apenas informações sobre faces e, finalmente, modelos sólidos representam o objeto por meio de vértices, arestas e faces sem ambigüidades geométricas na descrição do objeto.

*Boundary representation* é baseado nas técnicas de modelagem de superfície que a precedeu. Uma representação dos contornos/limites do modelo do produto pode ser visto como uma estrutura topológica de primitivas de baixo nível como faces, arestas e vértices que definem um sólido. A Figure 4.1 apresenta um exemplo de uma da estrutura de dados da representação B-rep.

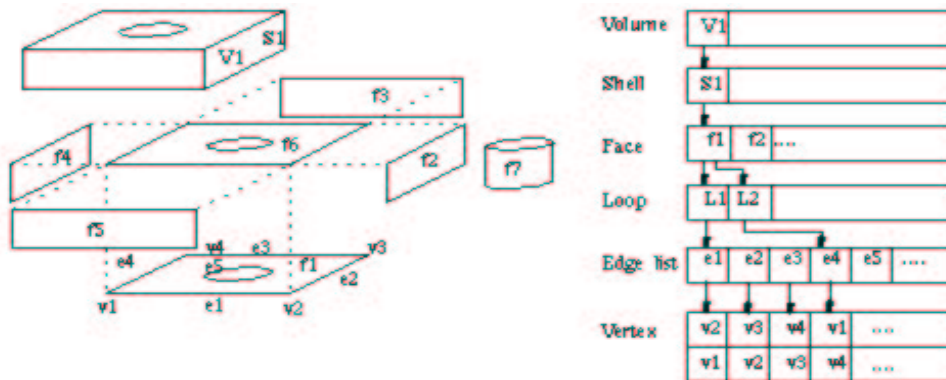
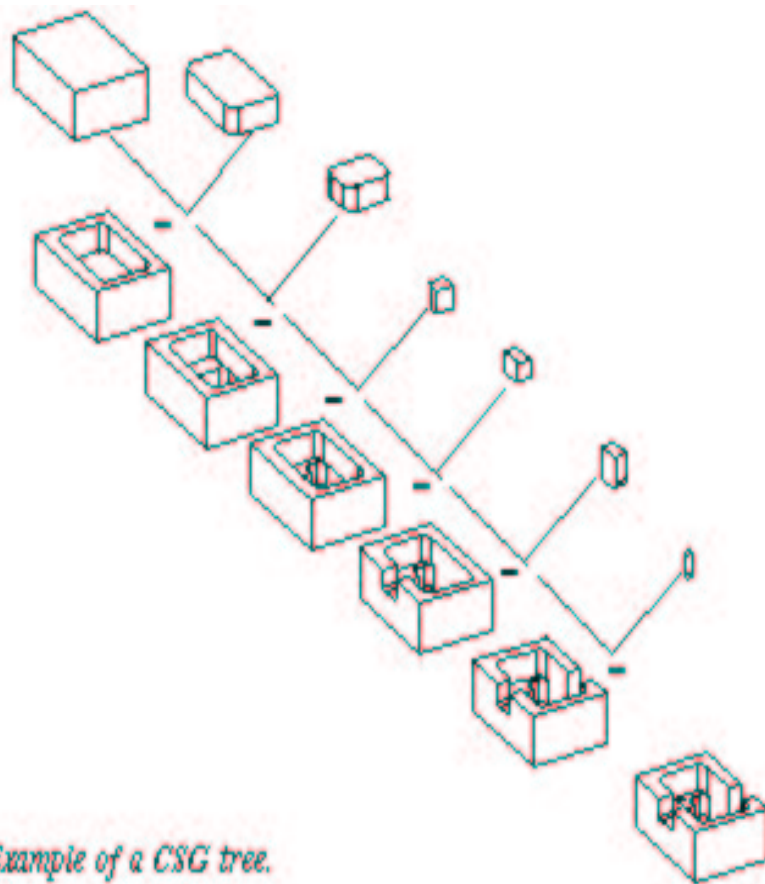


Figure 2.1 Example of a simple model and part of its boundary representation data structure.

Figura 4.1: Exemplo da representação B-rep.

CSG é um método para criar sólidos que usam objetos primitivos que podem ser combinados por operações booleanas: união, interseção e diferença. Modelos de CSG são árvores binárias nas quais os objetos primitivos são as folhas da árvore do modelo de produto. Cada primitivo é associado com uma transformação 3D que especifica sua posição, orientação e dimensões. Um benefício de modelos em CSG é que a história de modelagem é mantida dentro da modelo. Um modelo de CSG não é único pois existem diferentes modos nas quais primitivas, transformações e operações podem representar o mesmo modelo de produto. Figure 4.2 apresenta um exemplo de uma árvore de CSG e sua geometria correspondente.



*Figure 2.2 Example of a CSG tree.*

Figura 4.2: Exemplo da representação CSG.

Ambos os esquemas de representação de sólidos têm vantagens e desvantagens. B-rep tem como desvantagem: é tedioso manter o modelo atualizado quando mudanças acontecerem e usa muito espaço de memória. Uma vantagem de B-rep é que cada superfície pode ser individualmente referenciada; isto representa um modelo bem estimado. Esta é uma propriedade que pode ser de grande uso na representação de tolerâncias. Esta vantagem de B-rep é a desvantagem de CSG; modelo não estimado. Uma vantagem de CSG é sua representação de alto nível combinada com o espaço de memória relativamente limitado requerido. Como as vantagens de um parece ser as desvantagens do outro e vice-versa, uma representação sólida híbrida empregando B-rep e CSG tem sido utilizada. São utilizados também esquemas de representação que combinam modelos sólidos com *wire-frame* e modelagem de superfície. Estes geralmente são chamados de esquemas de representação *non-manifold* (WEILLER, 1988) e (MASUDA, 1990). Pesquisa em modelagem de sólido é descrita em Wilson (1988).

#### 4.1.1 Funcionalidade oferecida pelos sistemas de CAD atuais

Os sistemas de CAD mais avançados dos dias atuais, como Pro-Engineer®, I-DEAS®, Cadds®, Bravo® e Catia®, entre outros, oferecem uma clara tendência para modelagem de sólido (3D). Modeladores sólidos são derivados freqüentemente de esboços 2D por extrusão ou operações de varredura. Estes sistemas estão oferecendo interação inteligente nas relações entre as entidades que são esboçadas (por exemplo Bravo® e I-DEAS®). Os sistemas de CAD de hoje freqüentemente oferecem modelagem baseada em *features* para detalhar componentes depois que a forma sólida genérica foi estabelecida (por exemplo através de esboços 2D em combinação com alguma operação de CAD). *Features*<sup>1</sup> são descritas em mais detalhe no próximo capítulo. Exemplos de *features* são furos, *pockets*, *slots*, etc.. Estas *features* podem ser somadas, apagadas ou podem ser modificadas no modelo de produto. A modificação da forma pode ser executada de forma paramétrica ou *variationally* (variacional); modelagem paramétrica ou *variational*.

Há um pouco de confusão sobre o significado de modelagem paramétrica e *variational* (variacional). Isto provavelmente ocorre devido ao fato de que não há uma definição clara de projeto paramétrico ou de projeto *variational*. Então, é difícil de classificar sistemas particulares em um grupo ou outro. Projetos paramétrico e *variational* focam-se em restrições geométricas, baseado na satisfação de restrições numéricas. Em projeto paramétrico as restrições numéricas são resolvidas em um modo de propagação. Um sistema de propagação trabalha bem em casos relativamente simples tendo dificuldade com modelos mais complexos. O projeto *variational* é mais genérico que projeto paramétrico. Kramer (1992) cita a seguinte definição para projeto paramétrico e *variational* de Chung (1989):

" We define VARIATIONAL DESIGN as a design methodology that utilizes fundamental graph theory and robust numerical solution techniques to provide constraint-driven capability applied to a coupled combination of geometric constraints and engineering equations. On the other hand, PARAMETRIC DESIGN is a design methodology that utilizes special case searching and solution techniques to provide dimension driven capability applied to primarily uncoupled geometric constraints and simple equations." (KRAMER, 1992)

Projeto paramétrico e *variational* concentram-se na modelagem da geometria nominal do modelo de produto. Porém, as variações da geometria nominal, as tolerâncias, são um aspecto de vital importância importante. Alguns dos sistemas de CAD mais avançados oferecem uma possibilidade para especificação de tolerância e análise de tolerância 2D, subsequente (por exemplo Mechanical Advantage® de Cognition® ou o sistema dedicado Valisys® que trabalha em cooperação com Catia®).

Sistemas de CAD oferecem freqüentemente a possibilidade de montar as partes sólidas detalhando-as em uma montagem. Uma subsequente análise cinemática ou dinâmica também é possível. Ligações com pacotes que trabalham com Método de Elementos Finito (FEM) também já existem, às vezes até mesmo associativo, isto é as *features* no lado de CAD e no lado da FEM são as mesmas. Alguns sistemas de CAD oferecem uma interface de programação para permitir que os usuários

<sup>1</sup> *Features* são elementos de forma de componentes com algum significado em engenharia.

desenvolvam as próprias aplicações. Alguns sistemas de CAD oferecem catálogos de componentes padrões que podem ser incorporados ao projeto. Sistemas de CAD de vendedores diferentes podem trocar informações do modelo do produto utilizando padrões de interface como: DXF, IGES, VDAFS, SET, STEP, entre outras. Gerenciamento de projeto está presente em alguns sistemas de CAD mais avançados, como I-DEAS® e Cadds®. Projeto cooperativo tem sido pouco oferecido por sistemas comerciais. Alguns sistemas oferecem para vários usuários a possibilidade de comunicação em um projeto. Isto pode ser alcançado, por exemplo, dando o controle do cursor a um dos projetistas e permitindo que os projetistas troquem informações por meio de janelas de texto utilizando correio eletrônico, *Chats* ou outro mecanismo de interação utilizando inclusive multimídia (imagem e som), dependendo da largura de banda disponível na rede de comunicação de computadores utilizada (ÁLVARES, 2001).

Sistemas de engenharia baseados no conhecimento com o ICAD®, oferecem uma funcionalidade um pouco diferente quando comparados aos sistemas de CAD "tradicionais". As interfaces de programação destes sistemas são mais sofisticadas que os sistemas de CAD "tradicionais", permitindo acesso mais fácil às funções de processamento de geometria. Normalmente, uma linguagem de programação orientada ao projeto especial, freqüentemente construída a partir da linguagem de programação Lisp. Regras (restrições) podem ser definidas facilmente em tais linguagens. Porém, a capacidade interativa destes sistemas são menores que nos sistemas de CAD "tradicionais". A razão para isto é que estes sistemas são focalizados mais na geração automática de projetos que na geração de projetos através de um processo de modelagem interativo e iterativo.

Freqüentemente, os sistemas de CAD de hoje não podem oferecer ao projetista realimentação de informação de custo ou qualquer outro tipo de realimentação de informação. Exceções são *Mechanical Advantage®* e *HP Sheet Metal Advisor®*. No *Mechanical Advantage®*, os usuários podem definir o próprio custo baseado na abordagem de sistema especialista com a sua própria informação de custo. O *HP Sheet Metal Advisor®* oferece realimentação orientada à fabricação para o projetista. O *HP Sheet Metal Advisor®* é restrito à peças de chapa metálica fina. No *HP Sheet Metal Advisor®*, *features* orientadas a manufatura são usados para projetar peças de chapas de metal. Vários regras de DFM são associadas às *features* que permitem a dar alguma realimentação orientada à manufatura ao usuário.

#### 4.1.2 Restrições nos atuais sistemas CAD

A maioria dos sistemas de CAD se restringem à fase de projeto detalhado. Apoio na fase de projeto conceitual e demais fases não são incluídos. Para mudar isto, muita pesquisa será requerida. Na seção anterior apresentou-se os sistemas de CAD que oferecem projeto baseado em *features*. Porém, as *features* que são oferecidas nos sistemas de CAD atuais, normalmente é pré-definida dentro do sistema. Ao usuário é permitido realizar alterações dos parâmetros das *features* (projeto paramétrico). Estas *features* parametricamente modificáveis são chamadas *features* definidas pelo usuário. O termo *features* definidas pelo usuário é confundindo um pouco com as *features* geométricas que o usuário pode definir, com a topologia<sup>2</sup> e outras características não relacionadas com a geometria da *feature*. Porém, para muitas aplicações é exigido que o usuário tenha a capacidade de construção de suas *features* em função da aplicação. Estas *features* deveriam ser aplicadas nos aspectos associados há uma geometria e topologia específica, incluindo também aspectos não relacionados a forma. Se isto fosse possível em um sistema de CAD, seria uma fonte de erros devido à programação exigida e ao trabalho tedioso. Nos sistemas de engenharia baseados no conhecimento como ICAD®, programação de novas *features* é geralmente possível, mas também pode ser um trabalho tedioso embora as possibilidades de definição de *features* são geralmente melhor que em sistemas de CAD mais tradicional (SALOMONS, 1992).

A integração de sistemas de CAD com sistemas de CAPP não foi completamente estabelecida. Isto é em parte devido à diferença entre as *features* usadas no sistema de CAD e as utilizadas no sistema de planejamento do processo. É muito difícil para um sistema de CAPP dar informação de

---

<sup>2</sup>Topologia é o modo no qual as faces, arestas e vértices estão conectados. Os elementos da topologia são conectados aos elementos geométricos, i.e. superfícies são conectadas às faces, curvas às arestas e pontos às vértices.

realimentação sobre manufaturabilidade ao projetista. Atualmente nenhum sistema CAD é capaz de manipular informações visando a realimentação realimentação do CAPP.

Normalmente métodos como DFMA não estão integrados aos sistemas de CAD atuais. Uma exceção, até certo ponto, é o sistema Pro-Engineer® que pode ser adquirido com um módulo de DFMA (BOOTHROYD, 1988). Porém, não há nenhum sistema de CAD comercial que execute uma "análise de DFMA inteligente": que possa responder automaticamente a *check lists*, que analisam um modelo de produto automaticamente com respeito à montagem e à manufatura levando em conta todas as possíveis oportunidades de manufatura e que dão uma análise quantitativa resultando também em recomendações de projeto.

Os sistemas de CAD atuais podem modelar montagens de peças sólidas previamente detalhadas. Isto reflete modo de projeto de baixo-cima; detalhando, inicialmente, cada peça e reunindo as peças em uma montagem. Em estudos descritivos do processo de projeto foi notado que projeto nem é executado estritamente de baixo-cima ou de cima-abaxo (ULLMAN, 1988). Então, um mix de modo de projeto de cima-abaxo e baixo-cima, é um modo mais natural de suporte de projeto. Os sistemas de CAD atuais oferecem apoio insuficiente de para este modo de projeto.

Atualmente os sistemas de CAD são baseado em projeto paramétrico ou *variational*. Os mecanismos de resolução das restrições geométricas nos sistemas de CAD foram analisados por Kramer (1992) e Thornton (1993a,b). As restrições matemáticas que determinam outras características de produto relacionadas a geometria são apresentadas em Thornton (1993a,b). Estas restrições não podem ser resolvidas facilmente em sistemas de CAD existentes, pois elas são acopladas e não lineares. Então, o modo no qual restrições têm que ser controladas em sistemas de CAD futuros tem que ser melhorado.

Embora exista alguns pacotes dedicados para a tarefa de análise de tolerância, os sistemas atuais de CAD apenas oferecem alguma funcionalidade satisfatória na especificação de tolerância, análise e síntese em 3D. Os pacotes de análise de tolerância existentes estão longe de ideal, pois são restringidos a geometria 2D, face às simplificações que são impostas (TURNER, 1991). O problema na análise de tolerância auxiliada por computador é em parte devido ao fato de que os padrões de tolerância atuais, ISO 1101 (ISO, 1983) e ANSI Y14.5 (ANSI 1982), são orientados ao desenho, em vez de direcionados para o uso de modelos sólidos em 3D. Poucos sistema de CAD suportam tolerâncias funcionais (WEILL, 1988). Tolerância auxiliada por computador é ainda um tópico de pesquisa que só recentemente tem sido aplicado em sistemas CAD.

Troca de dados de produto é executada freqüentemente em um baixo nível de detalhamento. No caso de IGES e DXF, a troca pode ser executada só 2D, desenhos técnicos. Quando a troca é executada no nível de sólidos, a troca acontece no nível de faces, arestas e vértices (no caso de B-rep) ou no nível de primitivas, suas transformações e operações booleanas (no caso de CSG). A troca de dados do modelo do produto quase não é executada no nível mais alto de *features*. Atualmente, o padrão emergente STEP (Padrão para a Troca de dados de Produto, *Standard for the Exchange of Product Data*), possibilita a troca de dados de produto em níveis mais altos de abstração, i.e. o nível de feature, nível de componente e nível de montagem (PASSO 1992).

Projeto cooperativo, um dos elementos fundamentais em CE, quase não é apoiado através de sistemas de CAD. Além do uso de janelas que permitem comunicação auditiva, visual ou textual é necessário usar um meio de comunicação mais amplo. No futuro a utilização de redes de computadores de maior velocidade certamente irá diminuir este tipo de restrição e facilitar a comunicação em um ambiente de projeto cooperativo.

Em re-projeto é requerido freqüentemente que a história de projeto ou intenção seja conhecida (ULLMAN, 1991). A gravação e a apresentação da história de projeto não é possível na maioria sistemas de CAD, ou seja os sistemas não tem uma memória de projeto. Isto significa que os porquê e como, não podem ser deduzido do modelo de produto. Para isto é necessário que os projetistas perguntem aos seus colegas a respeito da memória do projeto ou busquem a informação na documentação do projeto.

Os sistemas de CAD de hoje forcem os operadores, de certa forma, a terminar o modelo de produto completamente em termos do modelo sólido que vai ser manufaturado na exata aparência de como foi modelado.

Sistemas de engenharia baseados no conhecimento tem algumas desvantagens. As mais impor-



tantes são: habilidades de programação são requeridas, leva tempo para levar o conhecimento ao sistema, baixo nível de interatividade e baixo desempenho (SALOMONS, 1992). Uma grande habilidade de programação é necessária sendo freqüentemente requerido treinamento para se trabalhar com estes sistemas como um "engenheiro" de conhecimento. Até mesmo uma pessoa altamente treinada, pode levar muito tempo para incluir todo o conhecimento exigido no sistema. Trabalhar através de uma interface gráfica interativa em sistemas de engenharia baseados no conhecimento não é possível da mesma forma como nos sistemas de CAD tradicionais. O baixo desempenho é devido principalmente a estrutura baseada em Lisp destes sistemas. Schmekel (1992) argumenta que sistemas baseados em Lisp deveriam ser evitados. Porém, o problema de desempenho é menor quando se utiliza de computadores mais rápidos. Os manipuladores de restrições em sistemas baseados no conhecimento como ICAD® podem controlar apenas regras uni-direcionais (restrições).

## 4.2 CAPP

Planejamento do Processo Auxiliado por Computador (CAPP) é o elo de ligação entre CAD e CAM. CAPP tem sido pesquisado desde os anos 60. Na década de setenta foi lançada a primeira aplicação comercial sendo direcionada para o armazenamento e recuperação de planos de processo para usinagem convencional. Pesquisas em sistemas de CAPP podem ser vistas em (PRESUNTO, 1988), (ALTING, 1989) e (ELMARAGHY, 1993).

O planejamento do processos auxiliado por computador (CAPP) é tido como parte fundamental de um sistema de Manufatura Integrada por Computador (CIM) por ser responsável pela ligação de dados de projeto (CAD) e fabricação (CAM) (EVERSHEIM e SCHNEEWIND, 1993). No passado, o desenvolvimento dos sistemas auxiliados por computador foi principalmente concentrado nos sistemas CAD (projeto) e CAM (manufatura). Devido à sua importância no contexto de um sistema CIM, nas últimas décadas grandes esforços têm sido empreendidos no sentido de um maior desenvolvimento de sistemas CAPP.

O ano de 1976 talvez seja o grande marco na corrida pelo desenvolvimento destes sistemas. Naquele ano, dois sistemas foram apresentados, um desenvolvido pela CAM-I (Computer Aided Manufacturing-International) e outro desenvolvido pela OIR (Organization of Industrial Research). Nos anos que se seguiram houve a apresentação de diversos outros sistemas (ALTING e ZANG, 1989), mas até os dias de hoje a sua aplicação industrial ainda não é uma realidade. O sistema comercial de CAPP mais famoso é o MetCapp® (<ftp://graco.unb.br/pub/capp/metcapp>). Geralmente, os sistemas de CAPP se enquadram em duas abordagens diferentes: variante e generativo.

### 4.2.1 Abordagens de sistemas CAPP

Para a construção de sistemas CAPP duas abordagens básicas são seguidas: variante e generativo. Contudo, alguns sistemas que foram construídos apresentam uma combinação das anteriores dando origem a um terceiro tipo: semi-generativo também chamado de híbrido.

#### Variante

A abordagem variante para o planejamento do processos é comparável à forma manual utilizada por um processista, onde o plano de processos para uma nova peça é obtido através de pequenas alterações executadas em um plano de processos já existente para uma peça similar. Em alguns sistemas variantes, as peças são agrupadas em famílias, caracterizadas por similaridades no processo de fabricação (Tecnologia de Grupo). Para cada família de peças, um plano de processos padrão que contém todas as possíveis operações, é armazenado no sistema. Através da classificação e codificação, um código é definido para cada peça, a partir de uma série de quesitos. Este código é então utilizado para definir a qual família a peça pertence e qual deve ser o plano padrão associado. Em comparação com o planejamento do processos manual, a abordagem variante é bastante vantajosa, pois a manipulação de informações se torna bem mais simples e os planos de

processos podem ser padronizados. Contudo, neste tipo de abordagem, a qualidade final do plano de processos ainda depende da habilidade do processista que realiza as modificações necessárias às particularidades de cada peça. Sendo assim, nos sistemas variantes, o computador é apenas uma ferramenta de auxílio às atividades de planejamento do processos.

O CAPP variante está associado com a codificação e classificação de peças baseadas na Tecnologia de Grupo<sup>3</sup>. Nesta abordagem, as peças são classificadas e codificadas baseado em várias características ou atributos. Um sistema de codificação de Tecnologia de Grupo pode ser usado para a recuperação de planos de processo para partes semelhantes. Grande parte dos sistemas CAPP variantes, relatados na literatura, se utilizam da tecnologia de grupo como ferramenta de implementação.

### Generativo

Neste tipo de abordagem, um novo plano de processos é gerado para cada peça do sistema, sem a intervenção de um processista. São utilizadas tabelas de decisão, árvores de decisão, fórmulas, regras de produção, sistemas especialistas, redes semânticas, etc, para definir quais são os procedimentos necessários para converter um material bruto em uma peça acabada. A entrada de informações sobre a peça para um sistema generativo pode ser do tipo texto, onde o usuário responde a uma série de questões predefinidas, ou do tipo gráfica, onde as características da peça são definidas através de um módulo de CAD. Quando se pensa em um sistema CIM, a utilização de uma interface gráfica para a definição da peça é a maneira mais interessante, pois desta forma a comunicação entre os módulos de CAD e CAPP fica prontamente estabelecida. A grande vantagem deste tipo de abordagem é que os planos de processos gerados são padronizados e completamente automatizados. Este tipo de abordagem torna-se bastante atraente para empresas que trabalham com uma grande variedade de produtos que são feitos em pequenos lotes.

O objetivo desta abordagem é a geração automática de planos de processo, a partir da descrição de uma nova peça. Frequentemente, a descrição da peça é um modelo sólido em CAD, por ser um modelo de produto de sem ambigüidades. Um banco de dados de manufatura, algoritmos e lógicas de tomada de decisão são os ingredientes principais de um sistema de CAPP generativo. Na década de oitenta, os sistemas de CAPP baseados em conhecimento usando técnicas de Inteligência Artificial (AI) foram desenvolvidos. Uma das técnicas de AI utilizadas em AI são os sistemas especialistas.

De acordo com Alting e Zang (1989) um sistema especialista pode ser definido como uma ferramenta que tem a capacidade de absorver conhecimento em um domínio específico, e utilizar este conhecimento para propor alternativas de solução. Até o começo dos anos 80, apesar dos esforços empreendidos, o desenvolvimento de sistemas CAPP não havia apresentado resultados muito satisfatórios. Isto porque o planejamento do processos é uma área onde não existem soluções algorítmicas, a capacidade de raciocinar é essencial e as ferramentas computacionais existentes até aquele momento eram muito limitadas neste sentido. Os sistemas especialistas, devido à capacidade de simular o processo de raciocínio de um ser humano, se apresentam como uma das ferramentas mais adequadas para o desenvolvimento de sistemas CAPP generativos.

### Semi-generativo ou híbrido

Este tipo de sistema aparece devido à dificuldade encontrada em se criar sistemas puramente generativos. Estes sistemas são um misto de sistemas variante e generativo. Aqui, várias tarefas que seriam realizadas pelo processista, num sistema variante, são automatizadas, mas algumas modificações no plano de processos gerado ainda são necessárias. Um sistema híbrido (generativo/variante) foi descrito por Detand (1993).

---

<sup>3</sup>A tecnologia de grupo (GT) pode ser definida como o estudo de uma grande população de itens aparentemente diferentes e a sua divisão em grupos com características similares. A utilização típica da tecnologia de grupo aparece no conceito de famílias de peças, onde a codificação e a classificação são utilizadas.

### 4.2.2 Funcionalidade de sistemas de CAPP e exemplos

Os sistemas de CAPP mais avançados têm como entrada de dados um modelo de produto baseado em CAD. Este modelo sólido é 3D no qual o sistema de CAPP pode executar o procedimento de reconhecimento de *features* automático. Porém, alguns sistemas de CAPP existente utilizam a modelos *wire-frame* como entrada de dados, necessitando que as *features* sejam identificadas manualmente (DETAND, 1993). Como alguns modelos de CAD, freqüentemente, não fornecem informações sobre tolerâncias e tipo de material, é necessário que os sistemas de CAPP permitam que se acrescente esta informação ao modelo de produto manualmente. A maioria dos sistemas de CAPP generativos permitem interação humana. Muitos sistemas de CAPP podem ser classificados como semi-variante ou semi-generativo.

#### Sistemas de CAPP: PART e PART-S

Os sistemas de planejamento do processo denominados PART (*Planning of Activities Resources and Technology*) e PART-S são sistemas de CAPP generativos desenvolvidos no *Laboratory of Production and Design Engineering* (HOUNTEN, 1991). A diferença entre os dois é que PART é um sistema mais antigo desenvolvido para peças prismáticas e disponível comercialmente (<http://www.tecnomatix.com>). PART-S é um sistema mais jovem, inspirado em seu antecessor voltado para processamento de chapa metálica. Depois dos sistemas de CAPP CUBIC (STOLTENKAMP, 1979), ROUND (HOUNTEN, 1984) e XPLANE (ERVE, 1988), PART e PART-S foram os sistemas CAPP que emergiram neste grupo de pesquisa (<ftp://omega.enm.unb.br/pub/doutorado/disco1/www.pt.wb.utwente.nl/projects>). O sistema PART é descrito extensivamente em Houten (1991) e PART-S em Vin (1994) e Vries (1995).

PART e PART-S compartilham a mesma filosofia, oferecendo a mesma funcionalidade (uma parte associada ao produto específico e outra ao processo). Em primeiro lugar, há a interface de CAD na qual uma representação modelo sólido de um sistema de CAD como Pro-Engineer® ou Catia® pode ser convertido na representação interna do modelador usado em PART. Se não foram acrescentadas tolerâncias ao modelo original, é possível editar as tolerâncias no editor de tolerância. Então reconhecimento de *features* automático pode começar. A sucessão de reconhecimento de *features* e outras atividades podem ser feitas dependendo da aplicação. A seguir são executadas as seguintes atividades: seleção de *setup*, determinação de métodos de usinagem, seleção de ferramenta de corte, seqüenciamento das operações de usinagem, geração do código G e planejamento de capacidade. A figura 4.3 apresenta a arquitetura do sistema PART e a figura 4.4 apresenta a arquitetura do sistema PART-S, bem parecida.

PART é voltado para aplicações em usinagem de peças prismáticas com 2.5D em processos de fresamento, furação, alargamento, etc.. As fases/atividades executadas no planejamento do processo são programas independentes que não precisam de nenhuma contribuição de outras fases ou interação de um operador durante sua execução. A sucessão na qual as fases são executadas, é pré-definido em um roteiro e executado por um *software* supervisor. Os vários módulos do sistema PART foram desenvolvidos em várias teses de doutoramento (HOUTEN, 1991).

Por exemplo, o módulo de sistema de fixação foi desenvolvido por Boerma (1990). O supervisor e a arquitetura de PART foram elaboradas por Jonkers (1992). Administração de ferramenta, seleção de ferramenta e condições de corte foram estudadas por Boogert (1994). A integração de PART com o planejamento da produção foi desenvolvida por Lenderink (1993).

### 4.2.3 Restrições dos sistemas de CAPP comerciais

A maioria dos sistemas de CAPP não podem manipular um modelo sólido em CAD baseado em *features*. Isto é, se eles não podem manipular como modelo, o modelo baseado em *features* deve ser convertido em correspondente representação de modelo sólido (B-rep, por exemplo) no qual o sistema possa inferir as *features* de manufatura por meio de reconhecimento de *features*. A identificação manual de *features* como por exemplo no caso de Detand (1993), é um trabalho intensivo e deve ser evitado. No caso de projeto baseado em *features* seguido por reconhecimento

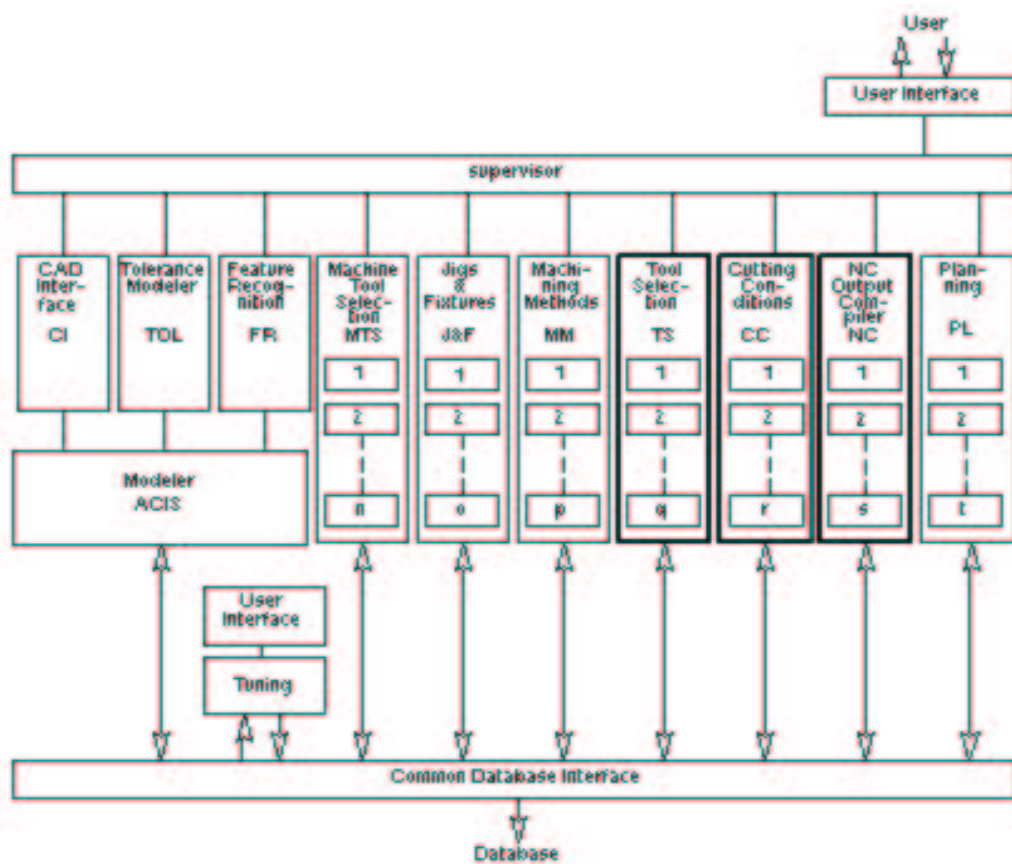


Figure 2.3 PART system software architecture (redrawn after [Houten 91]).

Figura 4.3: Arquitetura do sistema PART.

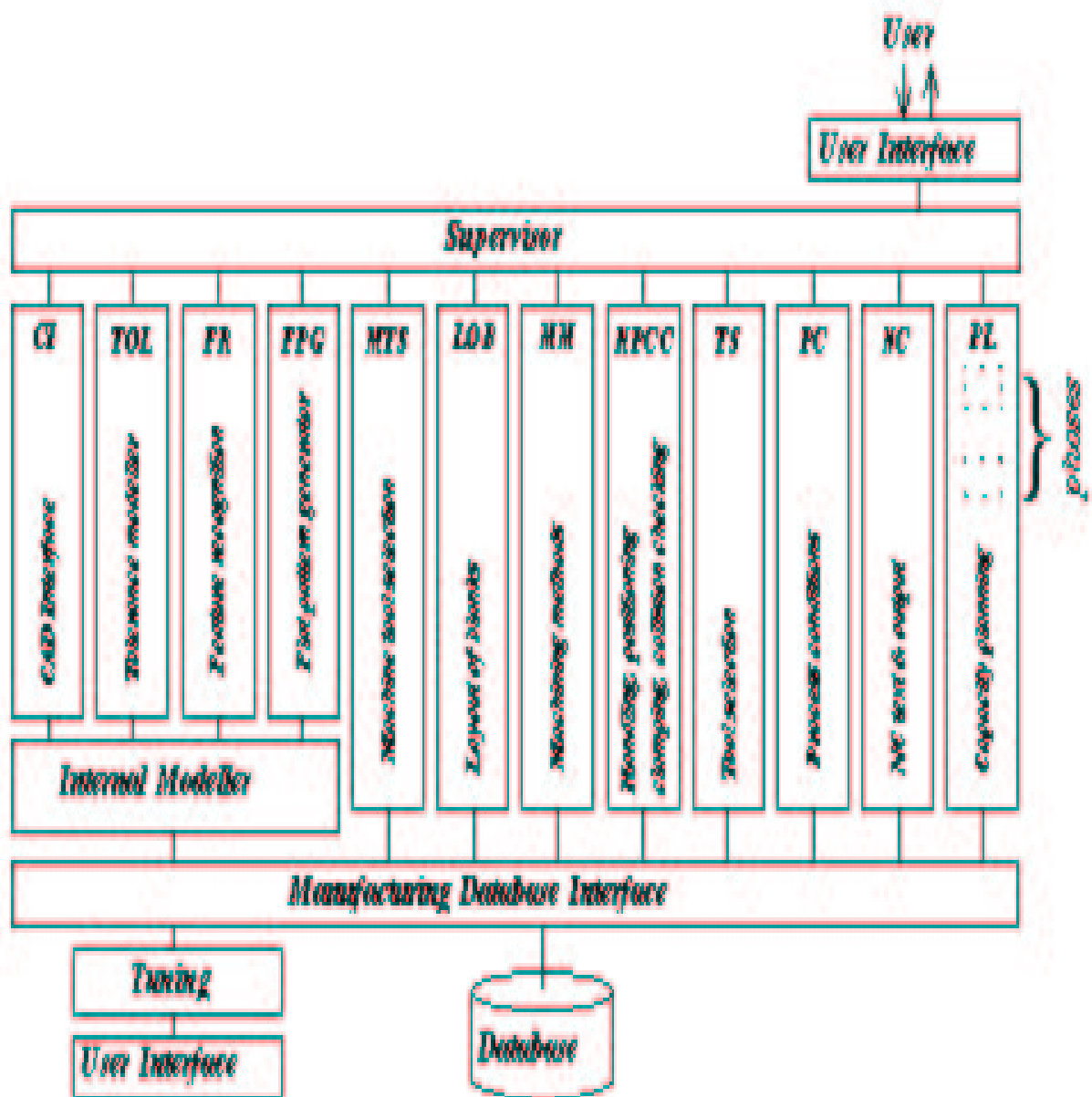


Figure 2.4 PART-S system architecture (redrawn from [Vin 94a] and [Vries 95]).

Figura 4.4: Arquitetura do sistema PART-S.

de *features* ou identificação de *features*, a informação de *feature* é inicialmente jogada fora e recuperada depois. Esta transferência de informação é ineficiente e poderia ser melhorada, pelo menos se estas *features* de projeto e as *features* de planejamento do processo forem correspondentes ou se eles puderem ser convertidos uma na outra e vice-versa. Porém, uma conversão de *features* pode ser dificultada devido as diversas representações de *features* em sistema CAD e CAPP. Na realidade, em algum sistemas de CAPP baseados em reconhecimento de *features*, as *features* são descritas dentro dos algoritmos de reconhecimento de *features*.

Um das falhas dos sistemas de CAPP comerciais é que eles não provêm o sistema de CAD, ou o projetista usa o sistema de CAD, com realimentação de informação de custo, manufaturabilidade, etc.. Muitos pesquisadores propuseram diferentes modos nos quais sistemas CAD e CAPP poderiam ficar mais cooperativos. Como a maioria destas propostas envolve o uso de *features*, eles serão discutidos no próximo capítulo.

Outra falha de sistemas de CAPP comerciais é que eles não se comunicam com funções de planejamento de capacidade. Antes de completar o plano de processo, a primeira parte do plano de processo é derivada de informação que fica disponível do reconhecimento de *features* e seleção de *setup*. Usando *setups* alternativos, os trabalhos/tarefas são assinalados para os recursos (carrregamento), baseado na disponibilidade atual e a carga de trabalho atual de todas as máquinas do chão-de-fábrica. Subseqüentemente, o plano de processo detalhado é completado. Em Detand (1993) esta abordagem baseada em planos de processo não lineares <sup>4</sup> é apresentada.

### 4.3 CAM

Manufatura Auxiliada por Computador é o estágio final do auxílio do computador na produção de peças mecânicas. Dessa forma, em referências mais antigas (pré-década de 90), CAM se encontra definido como o uso de sistemas de computação para planejar, gerenciar e controlar as operações de uma planta, através de interface computadorizada direta ou indireta com a produção (GROOVER, 1985). Dentro dessa definição, Groover dividiu o CAM em duas grandes categorias:

1. Execução (monitoramento e controle por computador): Estas são as aplicações diretas nas quais o computador se conecta diretamente com o processo de manufatura com o propósito de monitorar ou controlar o processo.
2. Planejamento (aplicações de suporte à manufatura): Estas são as aplicações indiretas nas quais o computador é usado como suporte das operações de produção na planta, mas não há interface direta entre o computador e o processo de manufatura.

O monitoramento de processo envolve uma interface direta com o processo de manufatura com o propósito de observar o processo e o equipamento associado e coletar dados do processo. O computador não é usado para controlar a operação diretamente. O controle continua nas mãos de operadores humanos, que podem ser guiados pelas informações compiladas pelo computador. O controle do processo por computador vai um passo além de apenas observar o processo, controlando-o a partir das observações.

Além das aplicações envolvendo uma interface direta computador-processo com o propósito de controle ou monitoramento do processo, a Manufatura Auxiliada por Computador também inclui aplicações indiretas nas quais o computador faz um papel de ajudante nas operações de manufatura da planta. Nessas aplicações o computador é usado fora da linha para prover planos, cronogramas, previsões, instruções e informações através das quais os recursos produtivos da empresa podem ser gerenciados mais efetivamente. Alguns exemplos de CAM para suporte à manufatura são:

- Programação de máquinas de controle numérico por computadores: Programas de controle são preparados para máquinas-ferramenta automáticas.

---

<sup>4</sup>Um plano de processo não linear inclui alternativas de manufatura diferentes podendo ser representado por uma estrutura de E/OU (Grafo E/OU)

- Planejamento de processos automatizado por computador: O computador prepara uma lista de seqüências de operações necessárias para processar um particular produto ou componente.
- Padrões de trabalho gerados por computador: O computador determina o padrão de tempo para uma operação particular.
- Programação de produção: O computador determina o programa adequado para atender às necessidades da produção.
- Planejamento das necessidades de materiais: o computador é usado para determinar quando pedir matérias-primas, componentes e quantos devem ser pedidos para atender à programação de produção.
- Controle de chão-de-fábrica: Nesta aplicação, dados são coletados da fábrica para determinar o progresso das várias ordens de produção.

Segundo Teicholz (1985) CAM está associado apenas com a geração de programas NC auxiliada por computador. Zeid (1991), propoem um gráfico onde se inclui, dentro do que ele chama de o processo CAM, desde o planejamento do processo, passando pelo planejamento da produção, o projeto e obtenção de novas ferramentas, o controle de pedidos, a programação NC, DNC (Comando Numérico Distribuído), a produção, o controle de qualidade e até a embalagem. Nesta abordagem CAM é visto como sendo a soma de ferramentas computacionais de manufatura sendo dividida em três tipos:

1. *Hardware*: unidade central, terminais, unidades de entrada e saída.
2. *Software*: bancos de dados, CAD, NC, MRP, etc.
3. Redes: de robôs, de células de manufatura, de sistemas de manipulação de materiais, etc.

É interessante notar que em todas as referências a CAM é sempre muito relacionada ao CAD, pois o objetivo sempre é passar do projeto à manufatura da maneira mais rápida e fácil possível. Desse modo, muitas vezes eles são citados de forma conjunta (sistemas CAD/CAM). A relação também é óbvia uma vez que as atividades CAM quase sempre necessitam de alguma informação CAD como entrada.

Como se pode ver, CAM sempre foi relacionado ao controle da manufatura como um todo. No entanto, atualmente, as ferramentas de *software* consideradas para CAM são aquelas ligadas unicamente à geração de programas para máquinas CN. Aparentemente, o nome CAM ficou associado a esse tipo de aplicação, já que esta, dentre as aplicações que se incluem sob o nome de CAM, foi a que se desenvolveu primeiro. As outras aplicações, ao se desenvolverem posteriormente, com o aumento generalizado do uso de computadores, ganharam depois nomes próprios, como CAPP (Planejamento do Processos Auxiliado por Computador) e CAPPc (Planejamento e Controle da Produção Auxiliado por Computador, que inclui MRP, controle de chão-de-fábrica, etc).

### 4.3.1 Integração ao ambiente

O *software* de CAM tem uma íntima relação com o CAD e na maioria das vezes importando modelos de produto a partir deste. Além disso, o *software* deve transmitir seus dados corretamente para a máquina-ferramenta, para que a usinagem seja realizada a contento. Assim a integração do CAM ao ambiente se dá nessas duas frentes: a comunicação CAD-CAM e a comunicação CAM-máquina-ferramenta.

1. Comunicação CAD-CAM: O programa de CAM em geral recebe como entrada um desenho (ou desenhos) do CAD, e a partir dele é feita a geração de caminhos de ferramenta, etc. O padrão de comunicação mais importante, sendo inclusive um padrão ANSI, é o IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*). Ele foi aprovado em setembro de 1981 como Padrão ANSI Y14.26M. Ele permite a troca de dados entre sistemas CAD/CAD. IGES funciona no nível

de banco de dados de objetos ou estrutura de dados de aplicações. Basicamente todos os pacotes comerciais de CAM lêem arquivos padrão IGES. Além do padrão IGES, existem outros tipos de arquivo que, por serem de larga utilização, também são suportados por grande parte dos pacotes. Alguns exemplos são o padrão DXF®, do AutoCAD®, o padrão VDA, o padrão CATIA®, etc.

2. Comunicação CAM-Máquinas-ferramenta: Como já foi dito anteriormente, o controlador das máquinas ferramenta somente tem condições de ler arquivos em linguagem G e semelhantes, que são a linguagem de mais baixo nível para esse tipo de aplicação. Assim, o sistema CAM deve gerar esse tipo de código para que ele seja carregado na máquina. Para isso existem os pós-processadores: gerar o código G a partir do formato de alto nível usado no pacote. No entanto, para cada combinação de controlador-máquina, é necessário um código diferente. Assim existem inúmeros pós-processadores diferentes. Os mais comuns costumam ser fornecidos junto com os sistemas CAM, porém em alguns casos pode ser necessário gerar um novo pós-processador.



## Capítulo 5

# Integração Projeto e Manufatura Baseado em *Features*

Nos capítulos anteriores a abordagem baseada em *features* foi considerada como um importante elemento no projeto e na manufatura auxiliada por computador. Também foi considerado como as *features* podem ser consideradas como um elemento de integração potencial entre o projeto e a manufatura. Este capítulo apresenta o papel das *features* no projeto, manufatura e como elemento de integração do CAD/CAPP/CAM.

A integração entre as etapas do ciclo produtivo é um dos caminhos que devem ser explorados na busca pela redução de custos e tempos de produção. De acordo com Jasthl *et al* (1994) a modelagem do produto é o ponto central para a promoção de tal integração.

Num sistema de produção integrado, o modelo do produto, definido no módulo de CAD, deve estar disponível para outros módulos (CAE, CAPP, CAM, CAQ, etc) para que estes possam realizar suas funções, assim como estes módulos devem ser capazes de enviar informações de volta para o módulo de CAD a fim de que alterações que sejam necessárias na peça possam ser efetuadas ainda na etapa de projeto (por problemas detectados na fabricação, por exemplo). A utilização de *features* como base de informação para a modelagem do produto é o caminho para se atingir esta integração (TÖNSHOFF *et al*, 1994). De acordo com SALOMONS *et al* (1993) a tecnologia de *features* é o caminho mais adequado para se promover a integração entre as atividades de projeto, planejamento do processos, fabricação, inspeção, etc. Este capítulo é baseado em Salomons (1993), Salomons (1995) e Rezende (1996).

### 5.1 Diferentes Visões sobre *Features*

De acordo com Shah, Mäntylä e Nau (1994), o primeiro trabalho relacionado com *features* foi realizado por Grayer durante seu doutorado em Cambridge, em 1976, onde *features* foram utilizadas para a automatização da geração de programas NC com base em desenhos feitos em um CAD.

Como as pesquisas em *features* são relativamente recentes, várias definições são apresentadas, cada uma formulada com base em conceitos de uma área específica. A seguir apresentam-se algumas definições encontradas na literatura:

Shah, Rogers *et al* (1990) apresentam o conceito de *features de forma* como sendo elementos físicos de uma peça que podem ser identificados por uma forma e por alguns atributos;

Mayer *et al* (1994) apresentam várias definições de *feature*, cada uma aplicada a uma área distinta:

- *feature de forma*: entidades relacionadas com a geometria e topologia de uma peça;
- *feature de tolerância*: entidade relacionada com os desvios aceitáveis nas dimensões de uma peça;

- *feature de material*: entidade relacionada com as propriedades mecânicas de uma peça;
- *feature funcional*: entidade relacionada com a funcionalidade da peça;
- *feature de montagem*: entidade relacionada às operações de montagem;

*Feature* é uma forma geométrica definida por um conjunto de parâmetros que têm significado especial para engenheiros de projeto e fabricação (JASTHI *et al*, 1994);

Irani *et al* (1995) definem *feature* do ponto de vista de planejamento do processos: *feature* pode ser identificada como uma modificação na forma, no acabamento superficial ou nas dimensões de uma peça, produzida por um determinado conjunto de operações.

Erve (1988) apresenta uma definição do ponto de vista de planejamento do processos, onde features de forma são tratadas como características de uma determinada peça, com uma forma geométrica definida, que podem ser utilizadas para especificação de processos de usinagem, fixação e medição. Figure 5.1 mostra alguns exemplos de features que aparecem em algumas peças (SALOMONS, 1995).

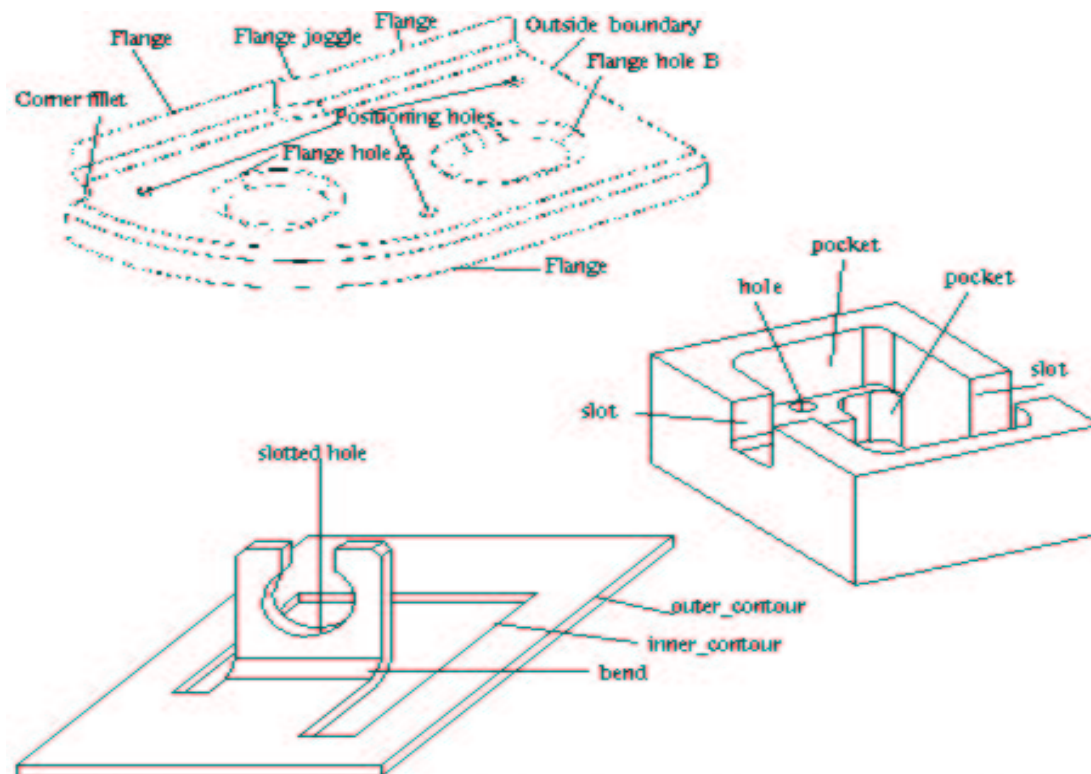


Figure 3.1 Some examples of features on different components; on top a component typical for application in aircraft and made by means of rubber pad forming (redrawn from [Kappert 93]), middle: a prismatic component suitable for PART and on the bottom: a sheet metal component suitable for PART-S.

Figura 5.1: Exemplos de *features*.

Salomons *et al* (1993) em sua revisão sobre pesquisas com projeto baseado em *features* apresentam um série de definições, algumas das quais foram coletadas na literatura. Assim, *features* podem ser:

1. um conjunto de informações referentes à forma assim como outros atributos de uma peça, de tal forma que este conjunto possa ser manipulado em projeto, manufatura e montagem (definição apresentada pelos autores);
2. configurações geométricas específicas formadas em uma superfície, aresta ou canto de uma peça. Este conceito é elaborado tendo por base o ponto de vista de planejamento do processos (Glossário Ilustrado de *Features* da CAM-I);
3. uma forma genérica que tem algum significado em engenharia;
4. um conjunto de informações usado para descrever uma peça. Cada *feature* possui informações relativas à funcionalidade, projeto e manufatura;
5. uma forma geométrica ou entidade cuja presença ou dimensões são requeridas para a realização de pelo menos uma das atividades de um sistema CIM;
6. uma entidade capaz de armazenar informações do produto que podem ajudar a atividade de projeto assim como a comunicação do projeto com a fabricação ou entre quaisquer outras atividades de engenharia;
7. uma entidade manipulada durante atividades de projeto, engenharia e manufatura (Relatório da CAM-I).

Em grande parte das definições apresentadas, busca-se estabelecer uma associação entre *feature* e forma geométrica. Isto se dá porque grande parte das aplicações que utilizam *features* são voltadas para a área de planejamento do processos, onde a forma geométrica é essencial, e o termo *feature* é utilizado para se referir a *feature de forma*. Para que *features* possam ser utilizadas como elemento de ligação entre as atividades do ciclo produtivo devem ser capazes de armazenar informações geométricas (forma e dimensões) e outros tipos de informações que sejam necessárias para a realização de alguma etapa do ciclo produtivo.

## 5.2 O Elo de Ligação Entre as Atividades de Projeto e Manufatura

Projeto e manufatura talvez sejam as etapas do ciclo produtivo que tiveram o maior avanço tecnológico das últimas décadas, com o desenvolvimento de sistemas CAD (de auxílio ao projeto) e dos sistemas CAM (de auxílio à geração de programas NC). Contudo, este desenvolvimento se deu de forma isolada, e a comunicação de sistemas CAD/CAM é hoje um grande problema, ocasionando um aumento exagerado no tempo de desenvolvimento de qualquer produto.

Este problema ocorre devido ao pequeno desenvolvimento dos sistemas CAPP, que na verdade têm a tarefa de promover a ligação entre dados de projeto e fabricação. A passagem de dados de projeto para planejamento do processos e deste para a fabricação deve então ser o ponto estudado.

Para a geração de um plano de processos, é necessário que uma análise detalhada da peça seja empreendida. Quando se deseja utilizar o computador para a geração de planos de processo, a utilização da tecnologia de *features* facilita a análise da peça (Salomons, 1995). Sendo assim, é interessante que os dados manipulados por um sistema CAPP estejam na forma de *features* de manufatura. Associado as *features* de manufatura no caso de processos de fabricação com remoção de material temos as *features* de usinagem<sup>1</sup>. Uma *feature* de usinagem é constituída por:

1. *Features* volumétricas: é o volume de material removido pela operação de usinagem para transformar a peça bruta em peça acabada. O volume removido é denominado de Volume Delta ou Volume Removido;
2. *Features* de superfície: é uma coleção de faces na peça que resulta da usinagem (subtração) de uma *feature* volumétrica.

---

<sup>1</sup> *Feature* de usinagem é a porção ou parte da peça afetada pela operação de usinagem.

A norma STEP define uma *machining\_feature* (nomenclatura STEP) como sendo uma “unidade de funcionalidade (UoF) que contem as informações necessárias para identificar as formas que representam os volumes de material que deve ser removido da peça por um processo de usinagem”. Já um *volume\_feature* é visto como o “volume adicionado ou subtraído de um volume pré-existente”. Uma *form\_feature* é um “*shape\_aspect* o qual conforma-se para algum padrão pré-concebido ou esteriótipo e é, para propósito de aplicação, tratado como uma ocorrência deste esteriótipo”.

Segundo Halevi e Weill (1995) e Hounten (1991) a modelagem baseada em feature é definida como um elemento físico da peça que tem algum significado específico de engenharia, devendo satisfazer as seguintes condições:

- ser um elemento físico da peça;
- se mapeável para uma forma genérica;
- ter um significado para engenharia ;
- ter propriedades que se possa prever.

De acordo com Shah, Mäntylä e Nau (1994) existem essencialmente duas formas de se fazer a preparação de dados de um produto, com base em *features* de manufatura, para o planejamento do processos:

- reconhecimento de *features* de manufatura a partir de um modelo sólido;
- mapeamento de *features* de projeto em *features* de manufatura.

### 5.3 Reconhecimento de *Features*

Neste tipo de abordagem, a peça criada no CAD é representada em termos de um modelo sólido. As *features* de manufatura são identificadas, com base neste modelo sólido, de forma automática ou de forma interativa.

Dentre as técnicas de reconhecimento mais utilizadas pode-se citar:

1. método de secção: é tipicamente utilizado para a geração de trajetórias de ferramentas para fresamento em 2,5D;
2. decomposição convexa: neste algoritmo ocorre a decomposição do volume do sólido em várias partes. A decomposição é efetuada a partir da subtração do volume do sólido da menor casca convexa que o envolve. O processo se repete até que o resultado da subtração seja um sólido de volume nulo;
3. métodos baseados no contorno: neste método, para cada feature, condições geométricas e topológicas que devem ser satisfeitas são identificadas. Para que o reconhecimento de uma determinada feature, no modelo sólido, seja executado, é feita uma procura no banco de dados geométrico para verificar se as condições relativas a esta feature são satisfeitas;
4. decomposição celular: este método tem sido aplicado para a determinação de volumes que devem ser usinados, a partir da subtração do modelo sólido da peça do modelo sólido da matéria-prima.

A revisão apresentada acima é apenas uma introdução às técnicas utilizadas. Detalhes de cada técnica podem ser encontrados nas referências: Henderson *et al* (1994), Kim (1994) e Sakurai e Chin (1994). Dentre os trabalhos encontrados na literatura, que se utilizam de reconhecimento de *features* pode-se citar: Ferreira (1990), Abdou e Cheng (1993) e Shah, Rogers *et al* (1990).

Alguns pesquisadores apresentam restrições com relação ao reconhecimento de *features* como Bronsvoort e Jansen (1994), que afirmam que o reconhecimento é de certa forma redundante, pois durante a etapa de projeto, informações de alto nível sobre o produto são transformadas em informações geométricas de baixo nível. Durante o reconhecimento de *features* as informações geométricas são re-processadas com o fim de recuperar as informações de alto nível perdidas.

## 5.4 Mapeamento de *Features*

Neste tipo de abordagem, uma biblioteca de *features* de projeto ou de manufatura é colocada à disposição do projetista, que cria a peça através da instanciação das *features* presentes nesta biblioteca (SHAH, BHATNAGAR e HSIAO, 1988) e (HAN, 1996). Desta forma podemos distinguir duas categorias de sistemas de projetos baseados em *features*: projeto com *features* de forma e projeto com *features* de manufatura (HAN, 1996).

### 5.4.1 Projeto com *features* de forma

Neste caso o modelo da peça é representado em termos de *features* de projeto. As *features* de manufatura são obtidas através da conversão ou mapeamento das *features* de projeto para o domínio da manufatura. De acordo com Shah citado por Shah, Mäntylä e Nau (1994) o mapeamento de *features* pode ser feito de diferentes maneiras, quais sejam:

1. um-para-um: quando a *feature* resultante do mapeamento é idêntica à *feature* mapeada, no caso *feature* de manufatura (do outro domínio);
2. re-parametrização variante: quando diferentes conjuntos de atributos são utilizados para representar a mesma *feature* em diferentes domínios;
3. agregação discreta: quando duas ou mais *features* de um domínio são mapeadas para uma única *feature* em outro domínio;
4. decomposição discreta: quando uma *feature* é mapeada para duas ou mais *features* em outro domínio;
5. conjugação: quando uma *feature* (obtida após o mapeamento) é resultante de apenas algumas partes de duas ou mais *features* de um outro domínio.

Uma revisão mais detalhada sobre mapeamento de *features* pode ser encontrada nas referências Gadh (1994) e Shah, Shen e Shirur (1994).

Para que seja possível ter o modelo da peça em termos de *features* de projeto, é necessário que se realize um projeto por *features*. De acordo com Finger e Dixon citados por Salomons (1995), a utilização do computador no auxílio às atividades de projeto pode se dar em três etapas, quais sejam:

- projeto conceitual ou preliminar;
- projeto estrutural ou de configuração;
- projeto paramétrico ou detalhado.

Sistemas de projeto por *features* têm sido construídos, como os relatados em Shah, Hsiao e Robinson (1990) e You, Chu e Kashuap (1989), mas são adequados somente para a etapa de detalhamento. As etapas de projeto estrutural e conceitual ainda não dispõem de sistemas baseados em *features*, como descrito no terceiro capítulo.

O planejamento do processos necessita, além da definição da geometria da peça, de dados como tolerâncias, acabamentos superficiais e especificações de material (Shah, Mäntylä e Nau, 1994). Se estes dados já estão prontos no modelo derivado de um CAD baseado em *features*, então, quando comparado a um sistema de reconhecimento de *features*, esta abordagem permite uma redução significativa no esforço empreendido para a comunicação CAD/CAPP. Por outro lado, ao utilizar um sistema de projeto por *features*, o projetista deve se limitar à utilização das *features* presentes na biblioteca. Esta seria então uma desvantagem do projeto por *features* em relação ao reconhecimento de *features*.

### 5.4.2 Projeto com *features* de manufatura

Segundo Pandiarajan & Dwivedi (1993) e Wright & Wang (1998) o projeto ou modelagem por *features* pode ser baseado em *features* de forma (projeto) ou *features* de manufatura. Na abordagem baseado em *features* de projeto é necessário utilizar-se de estratégias de mapeamento de *features*, conforme apresentado no tópico anterior.

Na abordagem com *features* de manufatura o projetista é forçado a definir a geometria da peça usando um conjunto de *features* associadas com um processo de manufatura específico. Exemplos de utilização desta abordagem (HAN, 1996) são os sistemas *QTC (Quick Tournaroud Cell)*, *First Cut* e *Cybercut* (<http://cybercut.berkeley.edu>). Para usinagem, as *features* disponíveis para o projetista são limitadas as *features* negativas<sup>2</sup> e todas são subtraídas da peça bruta. A vantagem deste método é que as *features* de usinagem estão diretamente disponíveis no modelo da peça não sendo necessário o reconhecimento ou mapeamento de *features*. A imposição deste método é a sua restrição pois assume que o projetista tem amplo conhecimento de manufatura e força o projetista a pensar em termos de *features* de manufatura. Normalmente, o projetista está interessado, inicialmente, na forma da peça e nos aspectos funcionais.

Normalmente a abordagem baseada em *features* de manufatura é empregada na modelagem de peças prismáticas associando o volume a ser removido de material da peça diretamente a *feature* de usinagem através da subtração de material da peça bruta em função da ferramenta de corte selecionada. Utiliza-se de um modelador sólido do tipo CSG por trabalhar diretamente com operações booleanas de subtração de *features* a partir da peça bruta até chegar à geometria desejada da peça acabada. Por exemplo, no processo de furação o volume de material removido está associado diretamente ao diâmetro da ferramenta, bastando definir uma operação booleana de subtração de um volume cilíndrico com determinadas dimensões de diâmetro (ferramenta) e comprimento (profundidade de corte).

Em peças cilíndricas/rotacionais esta associação não é tão óbvia como nas peças prismáticas quando se utiliza modeladores CSG, pois o projetista deve associar o volume a ser removido de material a forma geométrica desejada, sendo esta estratégia pouco utilizada nas peças rotacionais. Como é possível representar uma peça rotacional através de 2D não é necessário utilizar-se de um modelador sólido (REZENDE, 1996) e (KURIC *et al*, 1998). No projeto de peças rotacionais é mais adequado utilizar a abordagem de projeto baseado em *features* de projeto trabalhando-se com uma biblioteca de *features* para criar a geometria desejada. As peças rotacionais podem ser formadas por dois grupos de *features* de projeto: *features* internas e *features* externas (WYSK *et al*, 1993) e (HAN, 1996).

## 5.5 Pesquisas Realizadas em *Features*

A tecnologia de *features* está ainda na sua infância, sendo necessária a realização de pesquisas referentes à sua aplicação nas etapas do ciclo produtivo. De acordo com Salomons (1995) as pesquisas em *features* têm sido encaminhadas nas áreas que se seguem:

- representação de *features*: procura definir como as *features* serão representadas internamente no computador. Dois aspectos devem ser considerados:
- forma: pode ser volumétrica ou superficial;
- significado de engenharia: é uma área onde os métodos estão muito pouco desenvolvidos. Nielsen citado por Salomons (1995) apresenta um trabalho onde as relações geométricas entre as *features* são utilizadas para capturar significado de engenharia;
- definição de *features*: procura definir quais os atributos tanto geométricos quanto tecnológicos que devem estar associados às *features*;

---

<sup>2</sup> *Features* de usinagem são todas *negativas* ou *subtrativas* no sentido de que elas são subtraídas da peça.

- *features* e restrições: procura definir quais as relações entre as restrições que são impostas sobre a peça e as *features* que a constituem;
- validação de *features*: procura determinar quais são as condições que devem ser satisfeitas para que as *features* sejam válidas. Por exemplo, um furo (*feature* negativa) não pode existir sem que esteja mergulhado num bloco ou eixo (*feature* positiva);
- múltiplas visões em *features*: devido às diferentes necessidades de diferentes aplicações, um mesmo componente pode ser visto de várias formas. Muitas vezes é interessante migrar de uma aplicação para outra e uma transformação de *features* se torna necessária. Esta área estuda os mecanismos de transformação de um domínio para outro. Por exemplo, pode ser necessária a análise de uma mesma peça por *softwares* de CAE e CAPP. Certamente as informações necessárias a cada *software* seriam diferentes;
- padronização de *features*: pesquisas nesta área buscam classificar e padronizar *features*. Os primeiros esforços neste sentido foram feitos para a padronização de *features* de forma e são relatados em CAM-I (1986). Esforços têm sido feitos no sentido de uma padronização não só de *features* de forma, mas de todas as informações necessárias no ciclo de vida de um produto através da norma STEP (Shah e Mathew, 1991). Os protocolos de aplicações da norma STEP AP224<sup>3</sup> e AP48<sup>4</sup> são um esforço para padronização de *features* de forma e de manufatura. Por exemplo a AP224 define dezesseis categorias de *features* de usinagem (*Machining\_features*). Em <ftp://omega.enm.unb.br/pub/doutorado/disco2/www.step-nc.org> pode-se consultar estas normas;
- *features* e linguagens: linguagens podem ser utilizadas para representar e definir *features*. Vários são os trabalhos citados por Salomons (1995) que buscam estabelecer linguagens adequadas para a descrição de *features*: Express, ADDL (Linguagem de Descrição de Projeto), FDL (Linguagem de Descrição Funcional) e PDGL (Linguagem Gráfica para o Projeto de Peças).

---

<sup>3</sup>Part224: Application protocol: Mechanical product definition for process planning using form *features*.

<sup>4</sup>Industrial Automation Systems - Product Data Representation and Exchange - Part 48: Form *Features*.





## Capítulo 6

# Sistemas CAPP Voltados Para Operações de Torneamento

Neste capítulo são apresentadas diversas arquiteturas de sistemas CAPP baseados na abordagem de *features* e desenvolvidos para operações de torneamento tanto de caráter acadêmico como comercial destacando os seguintes sistemas: ROUND (HOUNTEN, 1991), AUTO\_PLAN e TECHCUT (HUANG, 1988), CAPP Grima (REZENDE, 1996) e Seicos Sigma  $\Sigma$  10L Multi Control (HITACHI, 2001).

### 6.1 ROUND

O sistema foi concebido a partir do sistema BID que era um programa interativo desenvolvido para cálculo econômico das condições de usinagem em operações de torneamento (HOUNTEN, 1977) e (KALS, 1978). O sistema desenvolvido executava otimizações levando em conta restrições técnicas de máquinas-ferramenta, sistemas de fixação, ferramentas e da peça. Contudo não era capaz de gerar o caminho da ferramenta, pois a geometria da peça era superficialmente especificada. Mais tarde, BID foi estendido com facilidades para visualizar graficamente restrições tecnológicas e melhorando o procedimento de otimização. BID foi a base para o desenvolvimento do sistema ROUND (HOUNTEN, 1981). Estes sistemas foram a base de desenvolvimento para diversas arquiteturas de sistema CAPP voltados para peças rotacionais, prismáticas e chapas metálicas desenvolvidos no *Laboratory of Production Engineering, Technical University of Eindhoven*.

#### 6.1.1 Arquitetura de ROUND

ROUND é um sistema de planejamento do processo generativo para operações de torneamento estruturado de forma modular. A arquitetura de ROUND é apresentada na figura 6.1. Os dados dos recursos de manufatura são armazenados em arquivos chamados de fixos. Módulos individuais tratam de (HOUNTEN, 1987):

- especificações geométricas (RNDINP);
- dispositivos de fixação (RNDFIX);
- seleção de ferramentas de corte para operações de acabamento (RNDFTL);
- cálculo de condições de usinagem para operações de acabamento (RNDFTE);
- determinação dos métodos de desbaste (RNDMTH);
- seleção de ferramentas de desbaste (RNDRTL);

- cálculo de condições de corte para operações de desbaste (RNDRTE);
- pós-processador (RNDPPR);
- módulo que prepara *set-point* para sistema de monitoramento do processo (RNDADC).

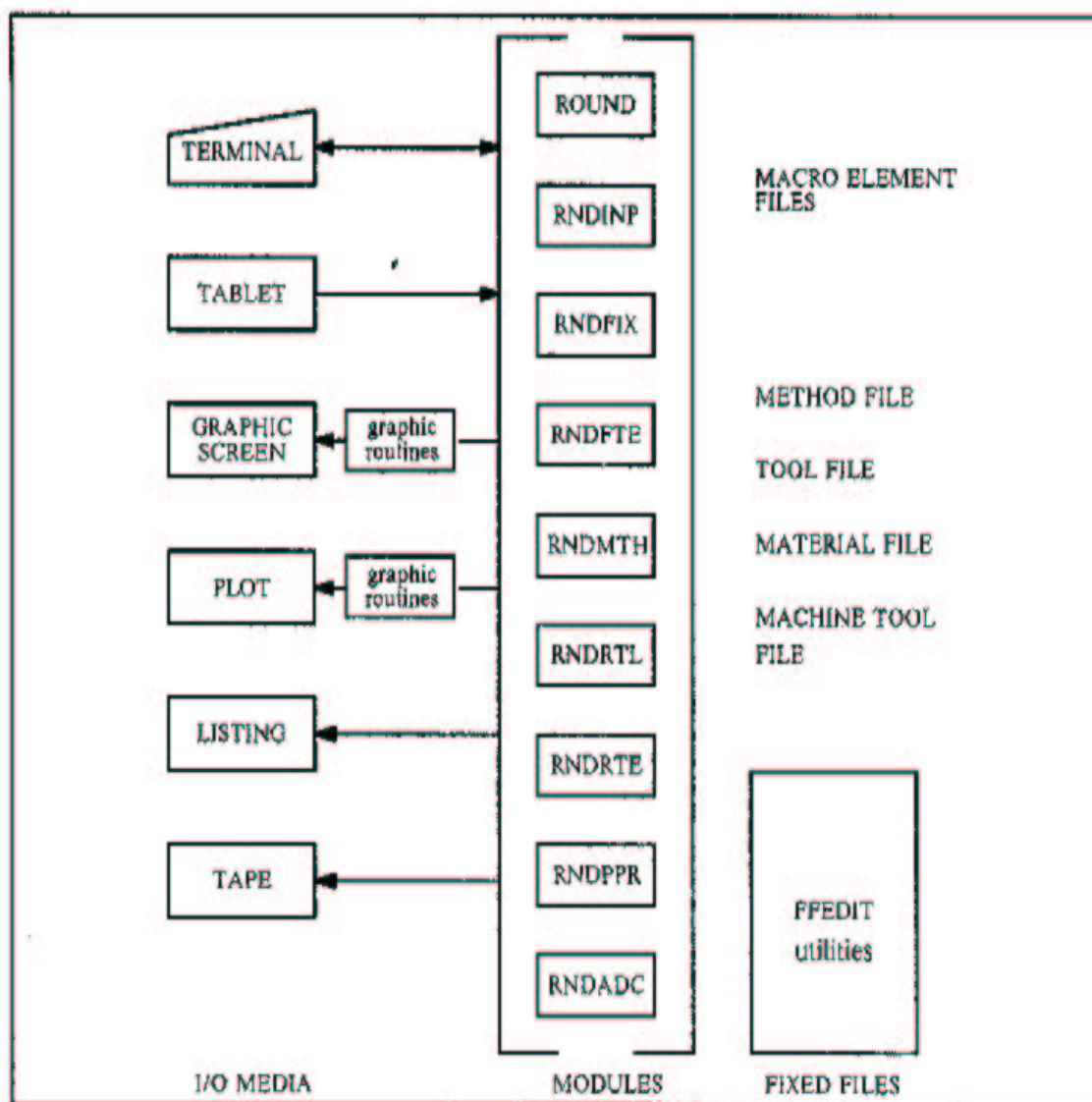


Figura 6.1: Arquitetura do sistema ROUND.

### Entrada da geometria da peça

A geometria da peça é especificada por meio de elementos de forma paramétricos como cilindros, elementos de forma convexas e côncavas, macros de elementos (combinação genérica de primitivas), entre outros. É também possível especificar tolerâncias e rugosidade superficial. A interface é orientada a menus. Parâmetros geométricos que são determinados pelo contexto podem ser omitidos e expressões aritméticas podem ser usadas. Este método de descrição geométrica tem provado ser muito eficiente para especificação de produto 2D. A figura 6.2 mostra uma tela associada à definição geométrica.

### Módulos associados à tecnologia de corte

No RNDFIX, a máquina de corte é selecionada interativamente. A seguir, alternativas de seqüências de fixação são avaliadas e os apropriados dispositivos de fixação são selecionados. Estas e todas as decisões posteriores são muito dependentes dos recursos. Como consequência não se consegue um re-planejamento de uma peça a ser torneada fora da especificação estabelecida de máquinas, dispositivos e ferramentas no sistema. ROUND executa estes módulos de forma automática, sendo possível gerar rapidamente planos de processo alternativos. O usuário pode aceitar as recomendações de ferramentas sugeridas pelo sistema ou pode escolher uma outra interagindo com o sistema. A figura 6.3 apresenta uma tela do sistema associada a um grupo de ferramentas de acabamento e as correspondentes áreas de usinagem. Quando requerido os módulos de tecnologia mostram os resultados do procedimento de otimização e o usuário é capaz de checar as aspectos críticos no cálculo das condições de corte em relação as restrições impostas pelos equipamentos e processos de corte. ROUND gera o programa NC, bem como, documentação e informações sobre as ferramentas, insertos, condições de usinagem, desgaste de ferramenta, número de peças a serem produzidos por inserto, tempos e custo de operação, potência requerida, entre outras.

### Análise de ROUND

ROUND é bastante funcional e tem boas características de visualização de resultados de cálculo e seleção de processos voltado para aplicações em pequenas e médias empresas de manufatura. Um dos pontos negativos do sistema está associado à seqüência na qual as decisões são tomadas que é fixo, ou seja sempre segue a mesma ordem, não tendo uma estrutura modular, sendo necessário a execução do módulos em ordem seqüencial. Quando um módulo falha todo o processo tem de ser reiniciado.

Como o sistema foi idealizado e implementado no início da década de oitenta ele apresenta muitas restrições associadas ao *hardware* disponível na época em termos de implementação. Com relação à arquitetura o sistema não foi concebido baseado em modelagem por *features* e sim em um sistema CAD 2D parametrizado. O sistema também não utiliza técnicas baseadas na representação de conhecimento, como sistemas especialistas, base de dados relacionais e outras abordagens que começaram a ser utilizadas em sistemas CAPP a partir do final da década de oitenta até os dias atuais.

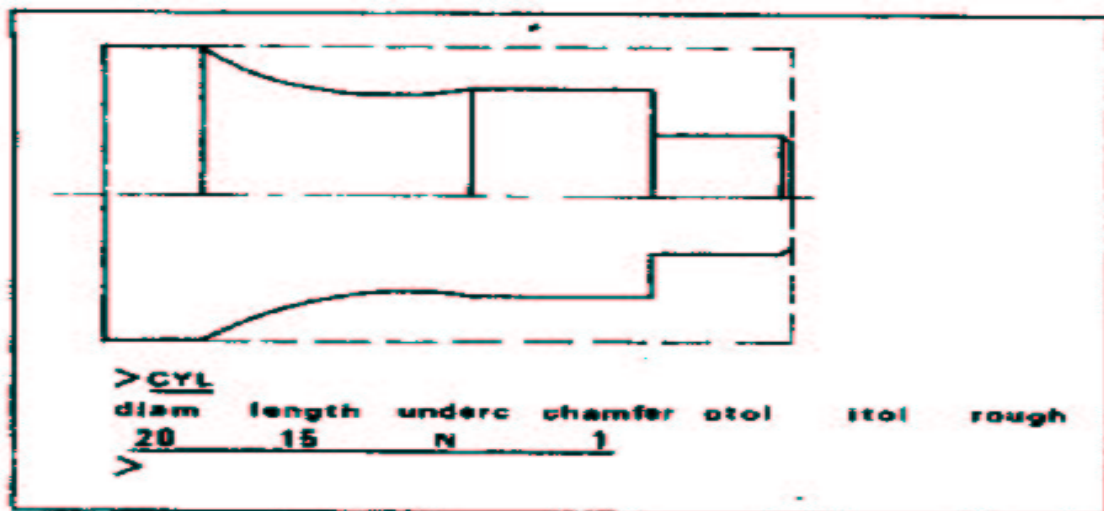


Figura 6.2: Uma tela da definição geométrica do sistema ROUND.

## 6.2 TECHTURN (Technological Oriented Turning System)

Techturn é um sistema de planejamento do processo generativo para peças torneadas que foi desenvolvido no *Manufacturing and Machine Tool Division of Mechanical Engineering Department* em *UMIST* desde de 1983 até 1988 (HUANG, 1988). Os estágios envolvidos no sistema são: entrada da geometria, planejamento do processo, seleção de ferramentas, cálculo das condições ótimas de usinagem e pós-processamento para geração do código NC. Cada estágio pode ser utilizado em modo manual ou automático. O módulo de planejamento do processo automatizado é chamado de AUTO-PLAN.

Para um dada peça a ser usinada, peça bruta e máquina, a primeira parte do sistema AUTO-PLAN determina o método de fixação, os dispositivos de fixação e as posições de fixação. Na determinação destes parâmetros o sistema leva em conta não apenas as informações geométricas sobre a peça a ser usinada e peça bruta, mas as informações sobre os recursos disponíveis, como dispositivos de fixação para uma dada máquina e requisitos tecnológicos definidos no projeto da peça, como tolerâncias de forma e posição (concentricidade, cilíndricidade, circularidade, entre outros).

A segunda parte do sistema AUTO-PLAN reconhece as *features* de projeto, como ranhuras, roscas, etc; determina os volumes de material a ser removido, determina o método mais econômico de usinagem para um dado volume de material; e finalmente faz o seqüenciamento das operações a serem executadas. AUTO-PLAN pode trabalhar com *features* assimétricas que podem ser usinadas em um centro de torneamento. Para cada operação determinada faz-se uma estimativa de custo utilizando procedimentos que calculam as condições otimizadas de corte. A determinação da seqüência de operações de torneamento é baseado em regras normalmente utilizadas tendo o cuidado de garantir que os requisitos tecnológicos serão satisfeitos. O sistema foi desenvolvido em Pascal, utilizando o sistema operacional DOS®.

### 6.2.1 Módulos do sistema TECHTURN

TECHTURN consiste dos seguintes módulos, apresentados na figura 6.4:

1. geometria (TURNINP).
2. planejamento (PP).

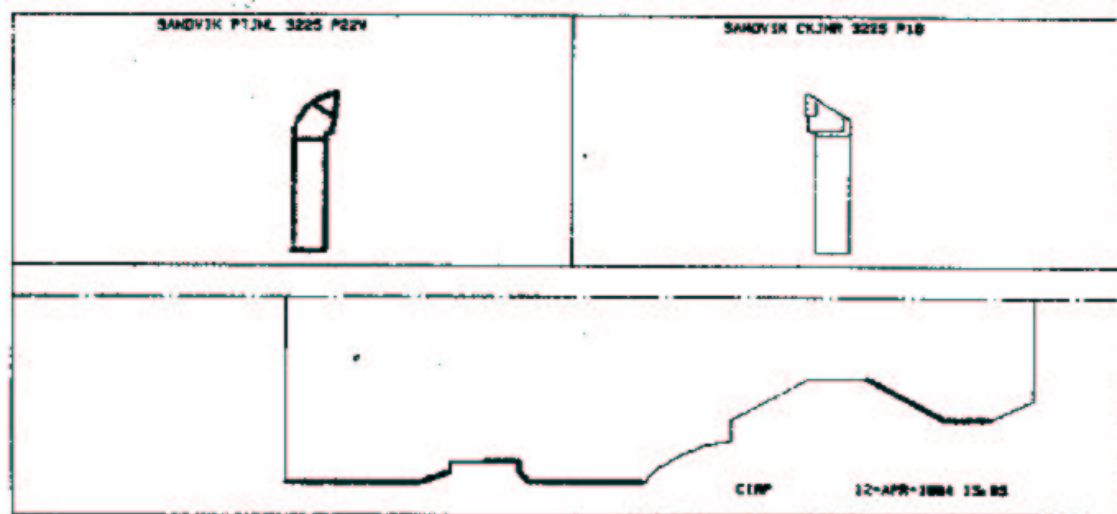


Figura 6.3: Uma tela associada a uma ferramenta de acabamento e a correspondente área de usinagem.

3. seleção de ferramentas (TSEL).
4. trajetória de ferramenta (TLPATH).
5. pós-processamento (MAC-SPEC/NCPOST).

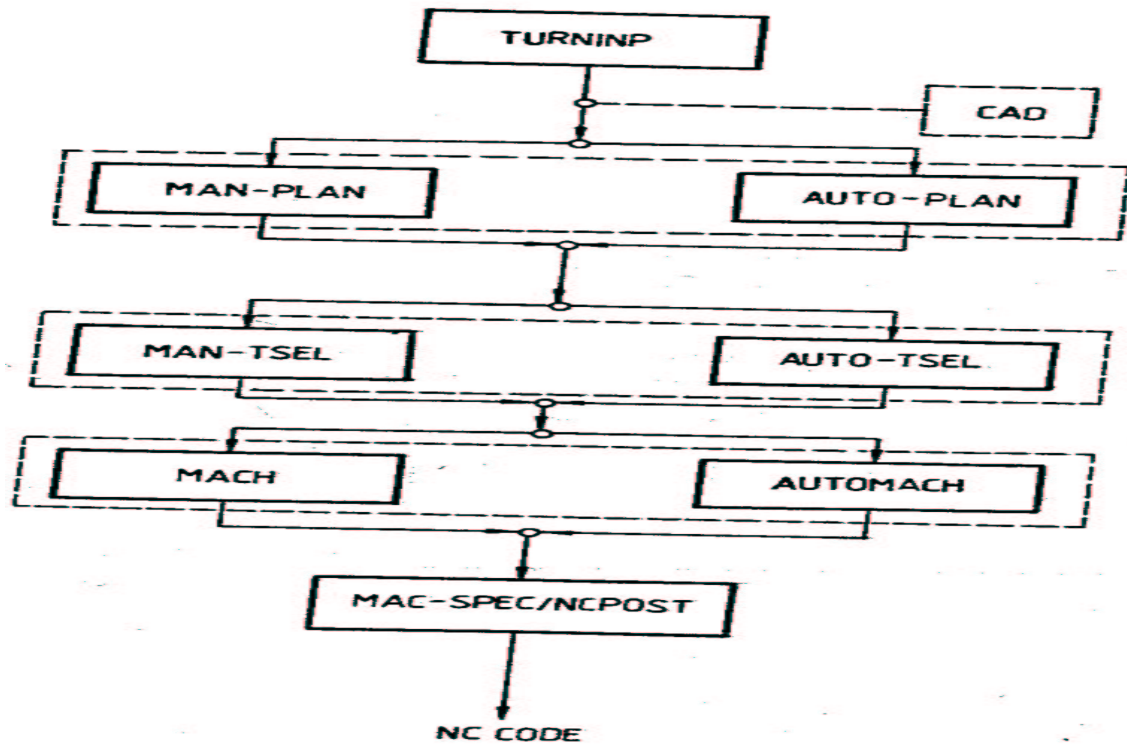


Figura 6.4: Fluxograma do sistema TECHTURN.

### Módulo de entrada da geometria

Este módulo, TURNINOP, é um módulo gráfico interativo que permite ao usuário especificar a geometria da peça bruta, peça acabada e requisitos tecnológicos da peça<sup>1</sup>. É orientado por menus e usa terminologia de chão-de-fábrica, facilitando seu uso. As primitivas geométricas, ou elementos, são definidas seqüencialmente. Todos os pontos de intersecção são calculados pelo sistema.

Se uma primitiva não está completamente definida o usuário pode entrar com as informações necessárias. Por exemplo, o raio deve ser um parâmetro conhecido para o arco. Note que a definição completa de um arco necessita de quatro tipos de informação de coordenadas: ponto de início, ponto final, centro e o raio. Um editor gráfico 2D é utilizado para inserir, apagar ou modificar primitivas.

O sistema não utiliza a abordagem de modelagem baseado em features de projeto ou manufatura. O que se faz é trabalhar com primitivas geométricas (pontos, linhas e arcos) para definir a geometria da peça.

### Módulo de planejamento

Este módulo é chamado de PP, tendo duas partes: um sub-módulo com uma interface gráfica-interativa denominada MAN-PLAN permitindo o planejamento do processo de forma interativa e

<sup>1</sup>Os requisitos tecnológicos são, normalmente, especificados através de tolerâncias dimensionais, tolerâncias de forma e posição, rugosidade superficial e tratamento térmico.

o AUTO-PLAN que executa o planejamento do processo de forma automática.

No modo de planejamento do processo interativo, o sistema possibilita que o usuário: selecione a peça acabada, o componente, e a peça bruta especificando o relacionamento entre elas; defina a configuração do sistema de fixação (método, dispositivo e pontos de fixação); especifique o volume de material a ser usinado para cada operação.

Já o AUTO-PLAN requer como entrada a informação geométrica da peça bruta e da peça acabada bem como dos requisitos tecnológicos da peça acabada. O sistema determina o tipo de fixação e gera um plano de operações completo (volume a ser removido, operações econômicas e a seqüência de operações a serem executadas).

### **Módulo de seleção de ferramenta**

Este módulo denominado de TSEL pode trabalhar no modo manual ou automático. O modo automático é baseado em uma abordagem baseada em heurística e de cálculo. O método pesquisa as ferramentas em uma biblioteca e descarta aquelas que apresentam restrições de ordem geométrica, por exemplo uma ferramenta que poderia causar colisões com a geometria da peça. As ferramentas selecionadas são arranjadas em ordem crescente associado ao custo de usinagem por gume do inserto selecionado. As condições de corte e o custo são calculadas para a ferramenta mais barata.

### **Módulo trajetória de ferramenta**

O módulo trajetória de ferramenta (TLPATH) se compõe de duas partes: uma interativa (MACH) e uma automática (AUTOMACH).

A parte interativa permite que o usuário especifique os parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) e então gerará a trajetória de ferramenta para usinagem da peça. O sistema faz também uma simulação do trajeto da ferramenta ao usuário. A saída de MACH é armazenada no padrão CLDATA (*Cutter Locate Data*) e serve como entrada para o módulo de pós-processamento (NCPOST) que gera o apropriado código G para o centro de torneamento definido.

AUTOMACH utiliza o CTP (*Cutting Technology Package*) para calcular os parâmetros de corte otimizados. O módulo gera o caminho da ferramenta para os parâmetros de corte otimizado e apresenta os resultados ao usuário de forma gráfica e armazenando o arquivo em formato CLDATA. Depois é feito o pós-processamento no módulo MAC-SPEC/NCPOST para a máquina selecionada.

### **Módulo de pós-processamento**

O módulo consiste de dois programas: MAC-SPEC e NCPOST. MAC-SPEC é um programa interativo que especifica detalhes da máquina e do seu sistema CNC. O segundo, NCPOST converte o CLDATA no apropriado código G para a máquina.

## **6.2.2 AUTOPLAN um Sistema de Planejamento do Processo Automatizado**

O sistema é constituído de dois módulos: SET\_UP e OP\_PLAN. SET\_UP determina a configuração do sistema de fixação (métodos, dispositivos e pontos de fixação) e também divide os elementos da peça em dois grupos, os elementos em um grupo sendo usinado dentro do mesmo *setup*. OP\_PLAN divide a peça bruta em sub-volumes, decide a operação para remover cada sub-volume e a seqüência de operações. Os módulos são independentes e a ligação entre eles são os dados relacionados à peça bruta, peça acabada, sistema de fixação e plano de processo gerado. O resultado final é armazenado no arquivo, PLAN.DAT, que é a entrada de dados para o módulo de seleção de ferramenta. A figura 6.5 apresenta a estrutura do sistema.

### Determinação do sistema de fixação da peça (SET\_UP)

É feita uma análise dos requisitos tecnológicos para seleção do sistema de fixação da peça (HUANG, 1988) baseados nos mesmos procedimentos adotados por um processista na definição da fixação da peça:

- análise do desenho da peça (tolerâncias dimensional, geométrica e acabamento superficial);
- define quais os elementos geométricos a serem usinados no mesmo *setup* para garantir os requisitos tecnológicos;
- define o sistema de fixação para os diversos *setup* (basicamente é a mesma abordagem definida no capítulo 3.3 e já apresentada no procedimento manual).

A figura 6.6 apresenta vários tipos de placas utilizadas na fixação da peça.

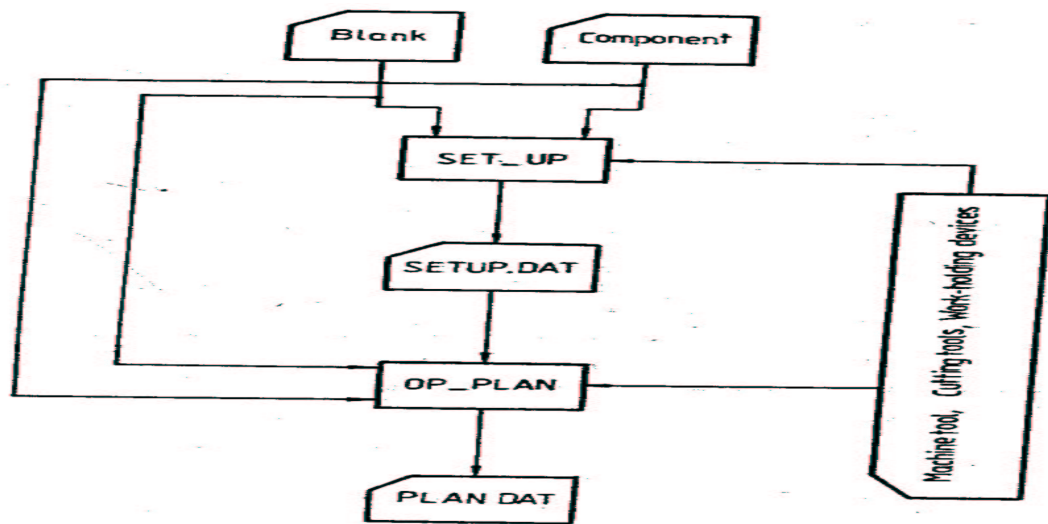


Figura 6.5: Estrutura do sistema AUTOPLAN.

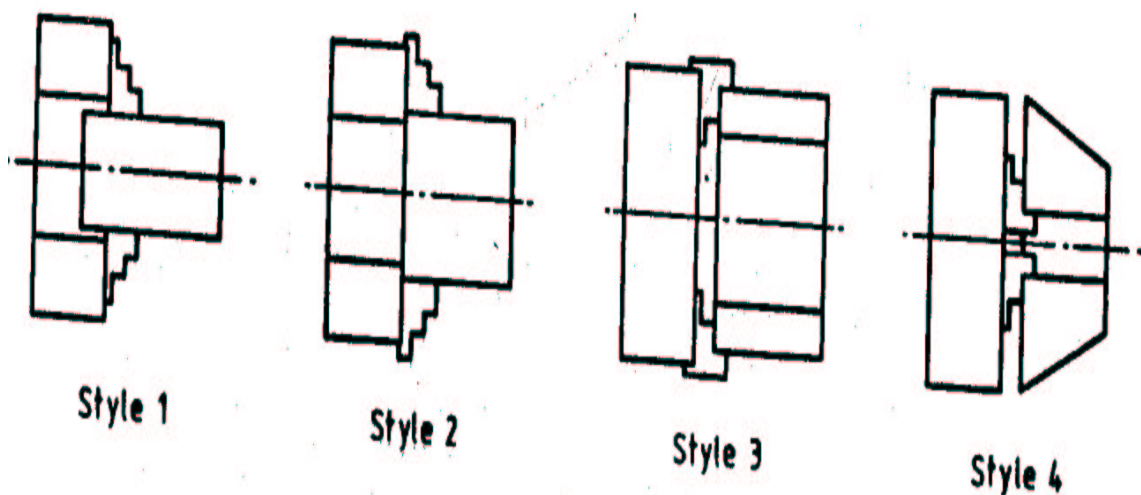


Figura 6.6: Tipos de placas utilizadas (HUANG, 1988).

### Planejamento de operação (OP\_PLAN)

As operações consideradas pelo OP\_PLAN são torneamento, faceamento, mandrilamento, furação, sangramento e rosqueamento em um torno CNC.

A metodologia de planejamento utilizada em OP\_PLAN é uma combinação de dois métodos: uma árvore de decisão e um método heurístico. Uma estrutura em árvore é construída e é podada através de regras pré-determinadas resultando em uma árvore de decisões mais simplificada. A árvore para planejamento de perfil externo é apresentada na figura 6.7a e a árvore para perfil interno é apresentada na figura 6.7b.

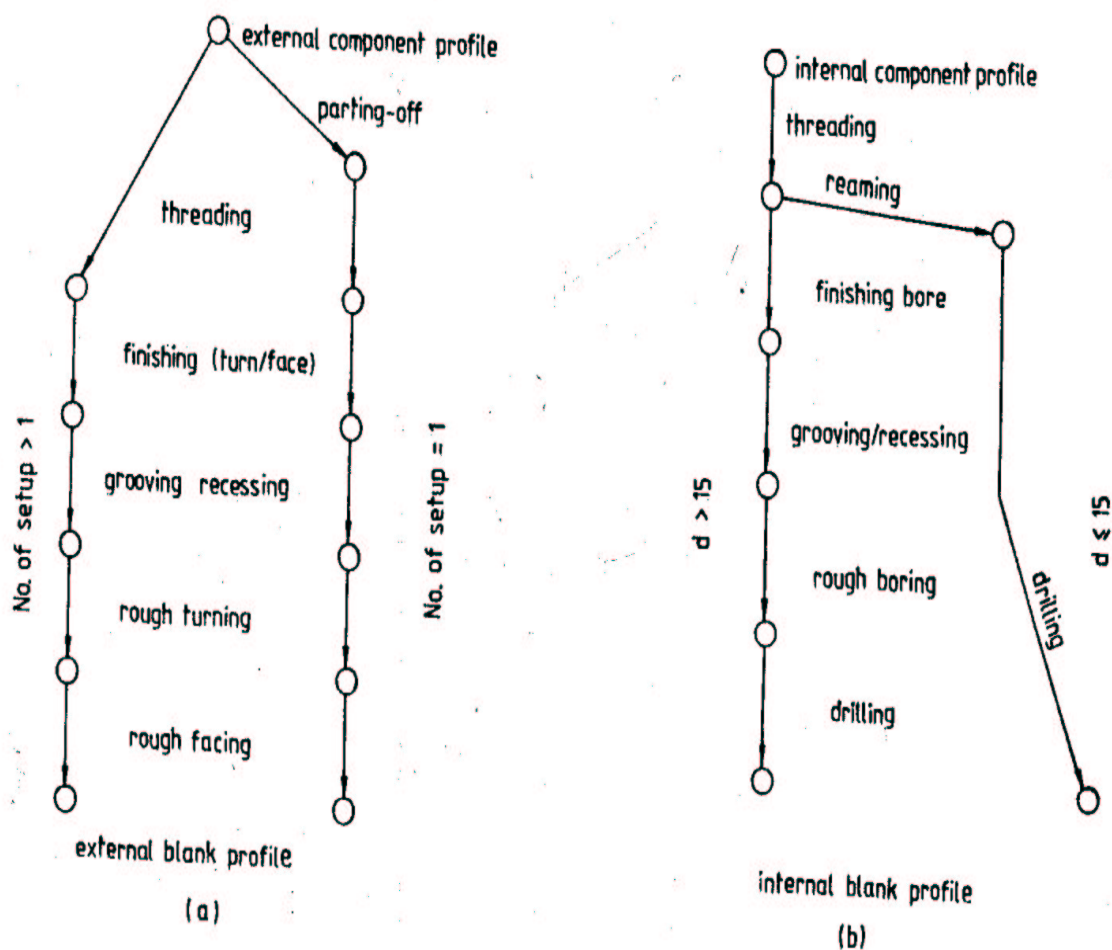


Figura 6.7: Árvores de decisão utilizadas no AUTOPLAN (HUANG, 1988).

A árvore é construída através do seguinte procedimento:

- reconhecimento de *features*;
- gera o volume a ser usinado e determina a operação;
- modifica a geometria da peça.

Este procedimento é repetido até que a árvore seja gerada. A figura 6.8 apresenta um exemplo.

As *features* presentes em peças torneadas são: diâmetro, face, rosca, cônico, chanfro, arco, rasgo e entalhe. No OP\_PLAN as *features* consideradas são classificadas em quatro categorias:



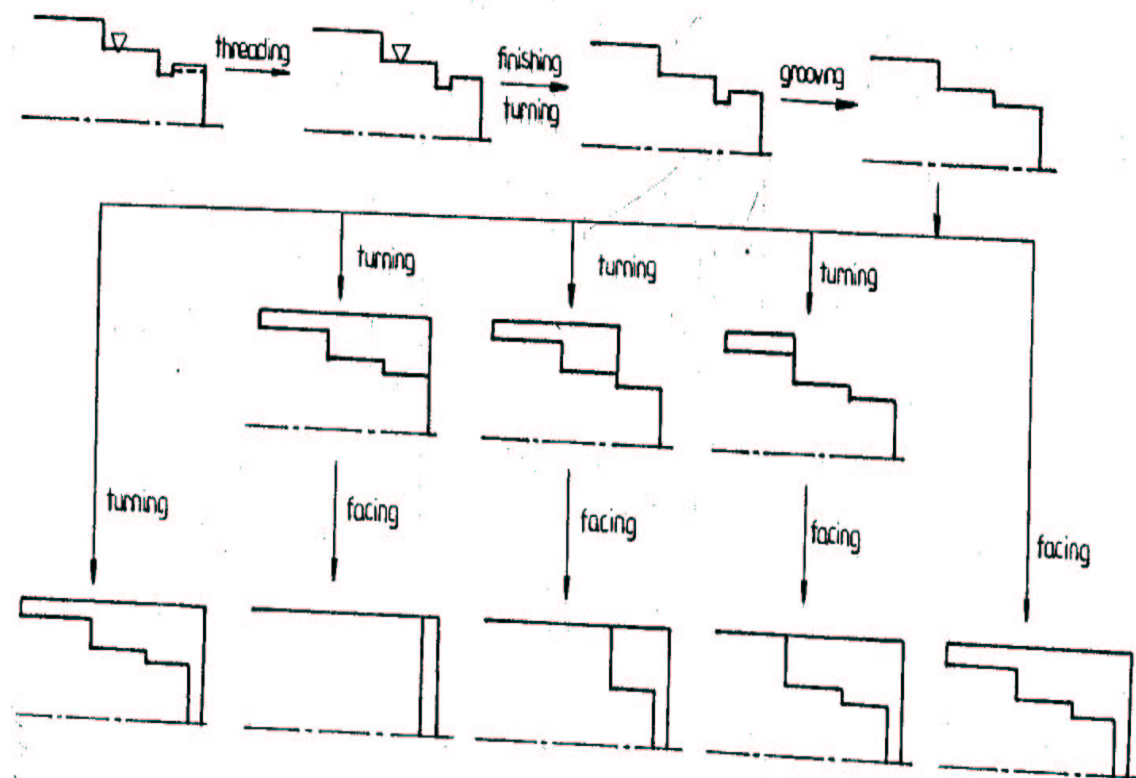


Figura 6.8: Um exemplo do procedimento associado a uma árvore de decisão (HUANG, 1988).

## 74CAPÍTULO 6. SISTEMAS CAPP VOLTADOS PARA OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO

- rosca;
- chanfro e rasgo;
- perfil externo;
- perfil interno.

A determinação do volume de material a ser removido e a operação é baseado no tipo de *feature* reconhecido pelo sistema. A cada *feature* reconhecida a área ou perfil de usinagem e a operação pode ser determinada. As operações de acabamento consistem de: rosqueamento, torneamento, faceamento, mandrilamento e alargamento. A operação final de acabamento constitui-se de um único passe. A profundidade de corte ainda não é conhecida e só será calculada pelo CTP depois que uma apropriada ferramenta de corte tenha sido selecionada.

Do ponto de vista da manufatura existem três regras que devem ser seguidas quando se vai determinar o seqüenciamento das operações:

- operações de desbaste devem ser executas em primeiro lugar;
- determinar os elementos de localização, isto é, referências de apoio e fabricação. As duas faces externas e furos de centro devem ser usinados em primeiro lugar;
- se um furo está presente em uma peça ele deve ser usinado primeiro.

OP-PLAN assume a seguinte seqüência de usinagem:

- se tem perfil interno remova a maior quantidade de material possível através de operações de furação;
- desbaste do perfil externo através de faceamento ou operações de torneamento;
- execute as operações de sangramento externo;
- execute operação de furação nas *features* que não podem ser usinadas por operações de mandrilamento;
- execute mandrilamento de desbaste no perfil interno;
- execute as operações de sangramento interno;
- acabamento dos elementos externos;
- rosqueamento externo;
- alargamento das *features* que não podem ser usinadas por operações de mandrilamento;
- acabamento do perfil interno;
- rosqueamento interno.

A otimização dos parâmetros de corte é realizada no OP\_PLAN por algoritmos que se utilizam da teoria clássica de usinagem baseando-se na nas abordagens mínimo custo e máxima taxa de produção. As restrições associadas à velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, força de corte e potência de corte devem ser levadas em consideração (HUANG, 1988). Trabalha-se com várias restrições para se determinar os parâmetros de corte de forma similar a estratégia adotada por Halevi e Weill (1995) e Wang e Li (1991) e descrito no capítulo três.

### 6.2.3 Análise do sistema AUTO-PLAN

A modelagem geométrica utilizado no sistema CAD não é baseada em *features*. Trabalha-se com elementos geométricos básicos (linhas, arcos, pontos, entre outros) para definição da geometria da peça. No módulo de planejamento do processo AUTO-PLAN faz o reconhecimento de *features* a partir da estrutura de dados geométrico em 2D com muitas limitações.

Este módulo faz parte do sistema TECHTURN e seu foco concentra-se do planejamento do processo que é executado de maneira similar ao procedimento manual elaborado por um processista. O processo automatizado de geração do plano de processo utiliza-se de várias estratégias para resolução dos problemas de planejamento do processo buscando normalmente o caminho baseado na otimização dos parâmetros de corte. Utiliza-se várias regras baseadas no conhecimento das operações de torneamento normalmente catalogadas em *handbooks* de usinagem.

Uma boa contribuição deste trabalho está associado a heurística e algoritmos propostos para resolução das várias atividades de planejamento do processo para peças torneadas. Sem dúvida muitas destas regras e algoritmos poderão ser utilizadas no trabalho de doutoramento em conjunto com as abordagens descritas por Halevi e Weill (1995) e Wang e Li (1991).

## 6.3 CAPP Grima

O CAPP Grima (REZENDE, 1996) se aplica à peças rotacionais que sejam executadas em células de manufatura com estratégia de usinagem bem definida. O modelo de sistema prevê a execução das seguintes tarefas de forma automática:

- análise do desenho da peça;
- seleção de superfícies de referência para a fabricação;
- seleção de métodos de usinagem;
- divisão da rota de processo em etapas;
- seleção de máquinas-ferramentas;
- seleção de ferramentas de corte;
- seleção de dispositivos de fixação.

Para que o sistema possa identificar as características de cada peça, é necessário que se defina uma forma eficiente de armazenamento de informações tanto geométricas quanto tecnológicas e do seu envio do CAD para o CAPP. Tendo em vista a adequação da tecnologia de *features* a esse propósito, o sistema foi concebido de forma a representar as informações de uma peça na forma de *features*.

O conceito de *features* adotado aqui é aquele apresentado por Salomons *et al* (1993), onde *features*<sup>2</sup> são definidas como um conjunto de informações referentes à forma, assim como outros atributos de uma peça. A cada etapa do ciclo produtivo podem estar associados diferentes conjuntos de informações. Sendo assim, tem-se a necessidade de um conjunto de *features* de projeto e outro de manufatura.

Devido à grande variedade e volume de dados manipulados durante a atividade de planejamento do processos, tem-se a necessidade de um sistema de informações bastante organizado, onde sejam evitadas duplicações que levem a inconsistências na base de dados.

Uma forma bastante prática de análise de sistemas, a análise orientada a objeto, onde os dados são organizados em classes, é adotada para a representação das informações do sistema.

De acordo com este tipo de análise, dados de uma peça são assim representados:

- Peça;

---

<sup>2</sup> *Features* são comparadas a “tijolos” utilizados na construção de peças.

- Código;
- Descrição;
- Tamanho de Lote;
- Material;
- Situação (Produção ou Reposição);
- Comprimento;
- *Features*.

**Comunicação CAD/CAPP** A comunicação entre o usuário e o sistema é feita através de um desenho onde são definidas todas as características funcionais da peça (desenho do projeto).

Com o objetivo de facilitar a criação do desenho de projeto, utiliza-se um módulo CAD elaborado com base na metodologia de projeto por *features*, onde as peças são construídas a partir de uma biblioteca paramétrica de *features* predefinidas. Assim, todas as peças criadas com base na biblioteca serão representadas por um conjunto finito de *features* presentes nesta biblioteca.

O plano de processos para a fabricação de uma determinada peça é feito com base no desenho de fabricação, o qual é obtido a partir do desenho de projeto.

A transformação do desenho de projeto em desenho de fabricação é feita através do mapeamento de *features*, ou seja, uma peça que tenha sido construída com base na biblioteca de *features* de projeto, agora terá a sua representação como elemento a ser fabricado, com base na biblioteca de *features* de fabricação (seção 2.3.2.2). É oportuno ressaltar que o mapeamento de *features* é função da célula de fabricação escolhida, sendo portanto uma parte móvel do sistema.

A tarefa de planejamento do processos de fabricação tem uma característica bastante peculiar: não existe um algoritmo predefinido para a geração de planos de processo. Assim, se faz necessária uma metodologia de programação que permita a utilização de heurísticas que representem a forma de pensar do processista.

A tecnologia de sistemas especialistas ou sistemas baseados no conhecimento utiliza regras do tipo *IF THEN* para representar o conhecimento de um especialista sobre algum assunto (no caso, o conhecimento do processista sobre planos de processo). A seqüência de execução não é previamente conhecida e o fluxo de controle é dado pelo disparo das regras que têm suas premissas satisfeitas. Esta técnica de programação é bastante conveniente para problemas que não tenham solução algorítmica, sendo portanto adotada neste sistema. Utilizou-se como ferramenta para o desenvolvimento de sistemas especialista o software CLIPS 6.02® para DOS® e Windows®. O sistema foi implementado em plataforma PC utilizando o sistema operacional DOS® e Windows®, como sistema CAD utilizou-se o AutoCAD® R12 e as linguagens de programação Autolisp® do AutoCAD e Borland C++®.

### 6.3.1 A estrutura do sistema

O sistema apresenta duas fases distintas:

1. a definição do desenho de projeto da peça: criação do desenho de projeto com base na biblioteca de *features* de projeto. O usuário se utiliza da interface gráfica no ambiente AutoCAD®.
2. a criação de um plano de processos para a peça:
  - transformação de *features* de projeto em *features* de fabricação ou mapeamento de *features* para a criação do desenho de fabricação;
  - atribuição de operações de usinagem a cada *feature*;

- seleção da máquina utilizada para cada operação;
- seleção da ferramenta utilizada para cada operação;
- seleção do dispositivo de fixação utilizado para cada operação;
- definição da seqüência de operações.

#### **A operação de usinagem como a base para o planejamento do processos**

Como pôde ser observado na seção anterior, a quase totalidade das etapas de planejamento do processos é feita com base nas operações que foram atribuídas às *features* (uma operação é atribuída a uma única *feature*, mas várias operações podem ser atribuídas à mesma *feature*). Sendo a operação de usinagem a base sobre a qual se constrói o plano de processos, uma caracterização detalhada de cada operação se faz necessária. A cada operação se associa os seguintes atributos:

- Nome: indica o tipo de operação (cilindramento, faceamento, sangramento, etc). É utilizado para a seleção de máquinas, ferramentas e dispositivos de fixação;
- Índice: número inteiro que indica a seqüência de operações. Cada operação é criada com um índice aleatório. Durante o seqüenciamento, as operações têm seus índices remanejados de forma que operações com índices menores sejam executadas no início do processo de fabricação;
- Ferramentas: contém os nomes das ferramentas que poderão ser utilizadas para a execução da operação. Com base no conjunto ferramentas de cada operação é que se escolhe a ferramenta que será realmente utilizada em cada operação;
- Dispositivos de Fixação: contém os nomes dos dispositivos de fixação que poderão ser utilizados para a execução da operação. A seleção de um dispositivo específico é feita a partir das regras de seleção de dispositivos de fixação;
- Tipo da Máquina :é utilizado para especificar qual o tipo de máquina mais conveniente para a execução da operação. É uma característica utilizada para selecionar a máquina específica;
- Máquinas: contém os nomes das máquinas que poderão ser utilizadas para a execução da operação. A seleção de uma máquina específica é feita a partir das regras de seleção de máquinas;
- Posição : classifica as operações quanto à posição da ferramenta em relação à peça trabalhada. Pode assumir os valores: externa, interna ou fora de centro;
- Direção de corte: classifica as operações quanto à direção do avanço da ferramenta ao cortar a peça. Pode assumir os valores: longitudinal, transversal ou perfil;
- Lado de corte: indica o posicionamento da aresta cortante da ferramenta a ser utilizada em relação à peça. Pode assumir os valores: esquerda, direita, ou central;
- *Feature*: contém o nome da feature à qual a operação está associada.
- Qualidade: indica a qualidade superficial que deverá ser atingida pela operação. Pode ser desbaste, semi-acabamento ou acabamento;
- Diâmetro, Comprimento, Largura e Profundidade: são possíveis dimensões de uma operação.

#### **Arquitetura do sistema**

A arquitetura do sistema é apresentada na figura 6.9 sendo dividido em duas partes: parte fixa e outra móvel:

a) o sistema apresenta as seguintes partes fixas (que não precisarão ser alteradas de uma célula para outra):

- interface gráfica;
- biblioteca de *features* de projeto;
- motor de inferência.

b) As partes que deverão ser ajustadas para cada célula em que o sistema seja utilizado são:

- biblioteca de *features* de fabricação;
- mapeador de *features* de projeto em *features* de fabricação;
- base de conhecimento (reflete a estratégia de usinagem);
- bancos de dados de máquinas, ferramentas e dispositivos de fixação.

De acordo com o modelo apresentado, a implementação do sistema em outra célula destinada à fabricação de peças rotacionais será simplesmente uma questão de adaptação de alguns módulos, pois a estrutura geral de comunicação será mantida. Assim, o tempo envolvido na expansão do sistema será bem menor que aquele requerido para o seu desenvolvimento completo.

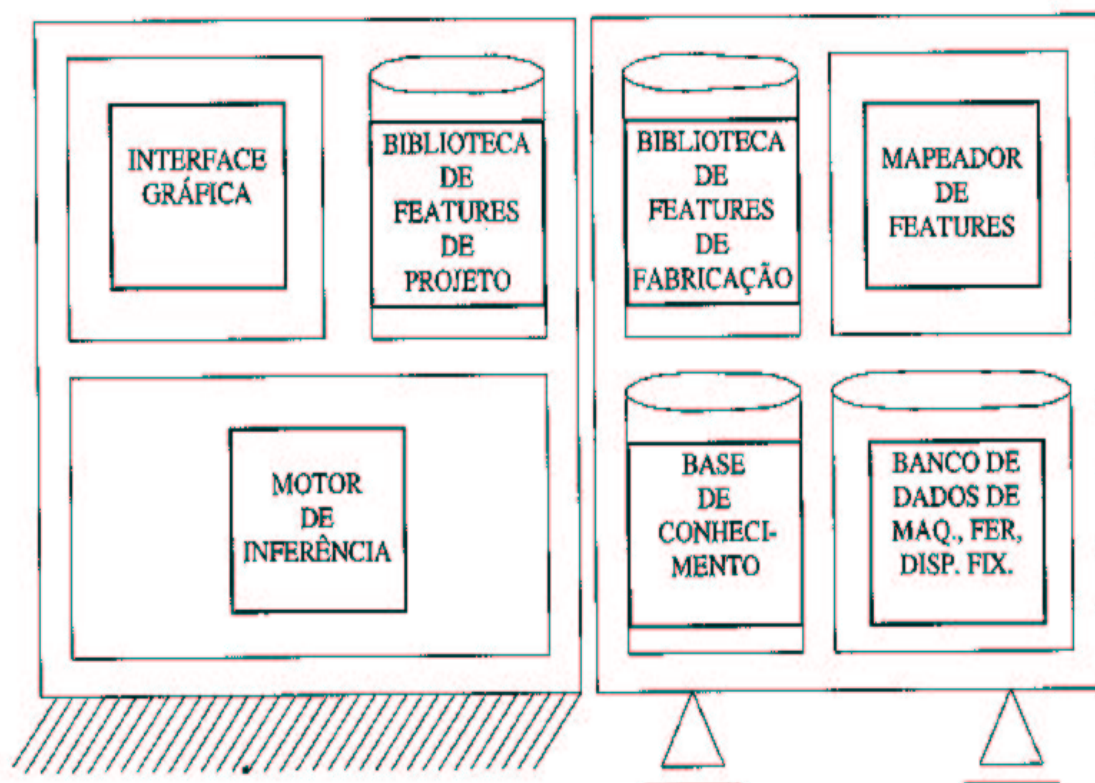


Figura 6.9: Arquitetura do sistema mostrando partes fixas e móveis que o constituem.

### 6.3.2 Hierarquia de *features*

o sistema se aplica a peças rotacionais, que podem ser obtidas por operações de torneamento e furação. Uma particularidade apresentada pela família de peças desta célula é que todas as peças apresentam escalonamento somente em um sentido na célula de manufatura da empresa SLC (Schneider Logemann Companhia) do setor agrícola. A hierarquia de *features* de projeto utilizada para representar as peças da célula utilizada como referência é mostrada a seguir:

*CLASSE FEATURE*

*Ponto X*

*Ponto Y*

*Posição*

*Operações*

*CLASSE QUEBRA DE CANTO É UMA FEATURE*

*Ângulo*

*Comprimento*

*CLASSE CHANFRO É UMA QUEBRA DE CANTO*

*Diâmetro*

*Sentido*

*CLASSE ESCAREADO É UMA QUEBRA DE CANTO*

*Diâmetro*

*Orientação*

*Sentido*

*CLASSE EIXO É UMA FEATURE*

*Comprimento*

*CLASSE EIXO CILÍNDRICO É UM EIXO*

*Diâmetro*

*CLASSE EIXO CÔNICO É UM EIXO*

*Diâmetro Esquerdo*

*Diâmetro Direito*

*CLASSE CANAL É UMA FEATURE*

*Diâmetro De Referência*

*Largura Do Fundo*

*CLASSE CANAL DE VEDAÇÃO É UM CANAL*

*Profundidade*

*Comprimento*

*Ângulo De Encosto*

*Raio De Alojamento*

*Raio De Borda*

*CLASSE CANAL DE RETENÇÃO É UM CANAL*

*Diâmetro Interno*

*CLASSE RASGO É UM CANAL*

*Diâmetro Interno*

*CLASSE FURO É UMA FEATURE*

*Orientação*

*CLASSE FURO CILÍNDRICO É UM FURO*

*Diâmetro*

*CLASSE FURO CILÍNDRICO PASSANTE É UM FURO CILÍNDRICO*

*Profundidade Do Furo*

*CLASSE FURO CILÍNDRICO CEGO É UM FURO CILÍNDRICO*

*Profundidade Do Furo*

*Sentido*

*CLASSE FURO CÔNICO É UM FURO*

*Diâmetro Maior*

*Diâmetro Menor*

*CLASSE FURO CÔNICO PASSANTE É UM FURO CÔNICO*

*Profundidade Do Furo*

*CLASSE FURO CÔNICO CEGO É UM FURO CÔNICO*

*Profundidade Do Furo*

*Sentido*

*CLASSE JUNÇÃO É UMA FEATURE*

*Sentido*

*CLASSE CONCORDÂNCIA É UMA JUNÇÃO*

*Diâmetro Maior*

*Raio De Concordância*

*CLASSE ABAULADO É UMA JUNÇÃO*

*Diâmetro*

*Raio De Concordância*

*CLASSE ROSCA É UMA FEATURE*

*Diâmetro*

*Passo*

*Profundidade Do Filete*

*Sentido Da Rosca*

*Perfil*

*CLASSE ROSCA INTERNA É UMA ROSCA*

*Orientação*

*CLASSE ROSCA PASSANTE É UMA ROSCA INTERNA*

*Profundidade Do Furo*

*CLASSE ROSCA CEGA É UMA ROSCA INTERNA*

*Profundidade Roscada*

*Profundidade Do Furo*

*Sentido*

*CLASSE ROSCA EXTERNA É UMA ROSCA*

*Comprimento Roscado*

*Comprimento Do Eixo*

*Sentido*

*CLASSE ELEMENTO DE FORMA É UMA FEATURE*

*Diâmetro Do Eixo*

*Comprimento*

*Diâmetro Do Elemento*

*Tipo*

### **6.3.3 A célula de manufatura**

O modelo proposto para o módulo CAPP prevê a existência de partes móveis, as quais apresentam dependência direta com as características da célula em que o sistema será implementado. Assim, uma definição detalhada dos meios de produção presentes em cada célula de fabricação é de suma importância.

Dentre os recursos que devem ser observados, os mais importantes são:

1. máquinas ferramentas disponíveis;
2. ferramentas disponíveis;
3. dispositivos de fixação utilizados.

As unidades que compõem a célula são especificados abaixo:

- SA-serra automática;
- PH-prensa hidráulica;



- TU-torno universal;
- TND-torno CNC TND 160 com alimentador de barras;
- TNS-torno CNC TNS 42 com alimentador de barras;
- XVT-torno XERVITT com alimentador de barras;
- FB59-furadeira de bancada;
- FB60-furadeira de bancada;
- FC34-furadeira de coluna;
- ferramentas de corte: para a execução das peças da célula, foram selecionadas ferramentas de corte adequadas: (SANDVIK, 1993), (STEMMER, 1993) e (GERLING, 1977).
- dispositivos de fixação: os dispositivos que são selecionados se enquadram nas seguintes categorias: pinças de fixação de barras e dispositivos específicos de furação.

#### 6.3.4 Estratégias de usinagem

A célula para a qual o sistema foi ajustado se presta à fabricação de peças de pouca precisão que apresentam escalonamento em um único sentido, utilizando-se de máquinas-ferramenta modernas (tornos CNC). A estratégia utilizada para a geração de planos de processo para as peças desta célula se baseia nos seguintes pontos:

- os equipamentos são capazes de garantir a precisão requerida para as peças. Assim as tolerâncias das peças não são levadas em consideração para a escolha das máquinas;
- devido à utilização de alimentadores de barras, nos tornos, as operações de torneamento são feitas em um único *setup*;
- todas as operações de torneamento são feitas da direita para a esquerda, ou seja, as ferramentas utilizadas são de corte à esquerda;
- as operações de furação devem, na medida do possível, ser feitas no torno;
- todas as operações de torneamento são feitas antes de qualquer operação que seja feita numa furadeira;
- todas as operações de roscar externo são feitas no torno;
- todas as operações de roscar interno são feitas numa furadeira, com a utilização de um cabeçote de rosqueamento;
- as peças devem sofrer um passe final de acabamento para garantir que não haja rebarbas;
- todas as barras e tubos devem ser cortados em pedaços de 2 metros;
- todas as barras devem ser endireitadas;
- todas as barras e tubos devem ter suas pontas chanfradas com ângulo de 30 graus a fim de que possam ser facilmente colocadas no alimentador de barras.

#### O mapeador de features

Devido à simplicidade das peças fabricadas nesta célula (peças com escalonamento em um único sentido) o mapeamento de *features* pôde ser feito na proporção de 1:1, ou seja, as bibliotecas de *features* de projeto e de fabricação são idênticas e a hierarquia de classes de *features* de fabricação é a mesma já apresentada para *features* de projeto. Desta forma os desenhos de projeto e de fabricação são os mesmos e a peça tem uma única representação em todo o sistema.

**As operações executadas na célula** Com base nas características da célula e na estratégia de usinagem adotada, define-se o conjunto de operações que poderão ser realizadas. A seguir apresentam-se os conjuntos de operações de torneamento que podem ser especificados<sup>3</sup>:

### **OPERAÇÕES GERAIS**

- Chanfrar: operação executada num torno universal onde o material (barra ou tubo) tem sua ponta chanfrada com um ângulo de 30 graus a fim de que possa ser introduzido no alimentador de barras.

### **OPERAÇÕES DETALHADAS**

- Cilindrar: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo do torno, no sentido da direita para a esquerda;
- Facear: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca perpendicularmente ao eixo do torno, avançando rumo ao centro de rotação da peça;
- Cortar : operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca perpendicularmente ao eixo do torno, avançando para o centro de rotação da peça, até que esta seja separada da barra;
- Roscar \_Externo: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo do torno, no sentido da direita para a esquerda. Este tipo de operação é efetuado com reversão no sentido de rotação da máquina e utilização de ferramenta com montagem invertida;
- Perfilar \_Côncavo: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca em perfil, no sentido da direita para a esquerda;
- Perfilar \_Convexo: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca em perfil, no sentido da direita para a esquerda;
- Sangrar: operação executada no torno CNC onde a ferramenta se desloca perpendicularmente ao eixo do torno rumo ao centro de rotação da peça, sem contudo promover a sua separação da barra. Nos casos em que largura da ferramenta é inferior à do rasgo haverá a necessidade de mais de um passe;
- Furar: operação executada no torno CNC ou na furadeira onde a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo do torno ou da furadeira. Chanfrar \_Esquerda: operação executada no torno CNC onde a ferramenta utilizada para cortar a peça da barra também é utilizada para executar pequenos chanfros que deveriam ser executados com ferramentas de corte à direita.

### **Base de conhecimento**

O funcionamento de um sistema especialista é regido pela sua base de conhecimento. O sistema CAPP desenvolvido com base na célula de manufatura da SLC tem a sua base de conhecimento dividida em módulos, que são descritos a seguir:

1. Módulo Material: contém as declarações das classes de material existentes no sistema, assim como as instâncias de barras e tubos .
2. Módulo Peça: contém as declarações das classes de *features* e da classe peça, assim como as instâncias de todas estas classes. É o módulo onde ficam armazenadas as informações da peça.

---

<sup>3</sup>Operações de serramento, prensamento, escareamento e rosca interna não serão apresentadas pois o foco são as operações de torneamento (REZENDE, 1996).

3. Módulo Máquinas: contém as declarações das classes de máquina, assim como todas as instâncias das máquinas encontradas no sistema.
4. Módulo Ferramentas: contém as declarações das classes de ferramenta, assim como todas as instâncias das ferramentas encontradas no sistema.
5. Módulo Dispositivos de Fixação: contém as declarações das classes de dispositivos de fixação, assim como todas as instâncias dos dispositivos encontradas no sistema.
6. Módulo Operações: contém as declarações das classes de operação, assim como todas as instâncias das operações atribuídas às *features* da peça.
7. Módulo Inverte: contém todas as regras e funções necessárias à definição da posição em que a peça será usinada nas operações de torneamento, assim como as funções para inversão de posição.
8. Módulo Atribui Operação: contém todas as regras e funções necessárias à atribuição de operações ao material (barra ou tubo) e às *features* da peça.
9. Módulo Selecciona Máquina: contém todas as regras e funções necessárias à escolha do tipo de máquina para cada operação assim como a escolha da máquina específica para cada operação.
10. Módulo Selecciona Ferramenta: contém todas as regras e funções necessárias à escolha de ferramentas para as operações de usinagem.
11. Módulo Selecciona Dispositivo de Fixação: contém todas as regras e funções necessárias à escolha dos dispositivos de fixação para cada operação.
12. Módulo Define Seqüência: contém todas as regras e funções necessárias à definição da seqüência de operações.

### 6.3.5 Análise do sistema CAPP

Na construção de um sistema CAPP, vários caminhos podem ser seguidos. O modelo apresentado se baseia em alguns pontos fundamentais, que são analisados a seguir:

1. modelo de informações baseado em *features*: a manipulação das informações de uma peça na forma de *features* é mais simples. A comunicação dos sistemas CAD/CAPP, através do mapeamento de *features*, se torna mais clara e a geração de um plano de processos é facilitada pela atribuição de operações de usinagem a cada feature. Este modelo de informações é bastante vantajoso;
2. técnica de programação por sistemas especialistas: a geração de planos de processo é uma tarefa que não pode ser realizada de forma algorítmica. A utilização de sistemas especialistas é uma alternativa viável, já que estes são adequados para este tipo de problema e existem ferramentas (shells) comerciais próprias para o seu desenvolvimento;
3. a operação de usinagem como base para o planejamento do processos: a utilização da operação de usinagem como centro do sistema de geração de planos de processo é adequada, pois a atribuição de operações às *features* é simples e a seleção de máquinas, ferramentas e dispositivos de fixação é feita de forma bastante natural para cada operação;
4. a estratégia de usinagem como chave para a base de conhecimento: a aquisição de conhecimento é um aspecto crítico no desenvolvimento de um sistema especialista. Tradicionalmente procura-se extrair um conjunto de regras do especialista no assunto, para construir a base de conhecimento. Esta abordagem dificulta a garantia de consistência e a realização da manutenção de tal base de conhecimento. O levantamento de uma estratégia de usinagem

significa a definição de princípios que devem ser seguidos durante todo o processo de fabricação. Desta forma, será mais simples garantir a consistência e fazer a manutenção de uma base de conhecimento criada com base na estratégia de usinagem, o que torna a metodologia adequada;

5. a personalização como forma de adaptação à realidade industrial: a célula para a qual o sistema foi adaptado é ligeiramente diferente da célula presente na empresa SLC. Em visita recente à referida empresa, foram observados pequenos ajustes (manutenção de regras), necessários para que o sistema seja adaptado à célula presente na empresa. Ajustes semelhantes (alteração de regras por mudança na estratégia de usinagem, atualização dos bancos de dados de ferramentas, máquinas e dispositivos de fixação) serão necessários para que o sistema seja adaptado a outras células. O modelo proposto para o sistema permite que tais alterações sejam facilmente implementadas, já que prevê a existência de uma parte móvel no sistema (figura 3.4). Assim, a adaptação do sistema à realidade de cada empresa fica garantida através da sua personalização.

Sistemas CAPP relatados na literatura encontram no tempo de processamento um obstáculo a ser vencido. O sistema PART apresentado por Houten (1991), que roda em estações de trabalho, utiliza processamento paralelo para diminuir o tempo de execução e mesmo assim vários minutos são necessários para que o sistema forneça uma resposta. O tempo gasto pelo *software* para a geração do plano de processo para uma peça, é de aproximadamente trinta segundos, para casos normais. Esta característica provavelmente se deve ao pequeno número de regras presentes no sistema. Isto porque o modelo proposto não procura resolver um problema genérico, mas sim, definir regras que garantam que a estratégia de usinagem adotada para a célula em questão seja seguida.

Com relação à portabilidade (adaptação a diferentes computadores) desejada no sistema, esta ainda não se mostra satisfatória, pois foram detectados conflitos no gerenciamento de memória quando o sistema foi instalado em alguns computadores com diferentes configurações. Uma solução definitiva para os problemas encontrados certamente seria conseguida com a migração do sistema para uma plataforma Windows, já que neste caso, as restrições de memória impostas pelo DOS não estariam presentes e o seu gerenciamento seria mais simples.

### **Sistemas CAPP: caminhos que devem ser seguidos**

Sistemas CAPP que venham a ser desenvolvidos deverão contemplar os seguintes fatores:

- customização: a fácil adaptação de um sistema à empresa onde será implantado é fundamental;
- inteligência: um sistema CAPP deve ser capaz de propor soluções alternativas, como faz um processista;
- fácil integração com *softwares* comerciais: para que seja possível a integração entre sistemas CAD/CAPP/CAM é necessário que o sistema CAPP desenvolvido seja de fácil integração com *softwares* de CAD e CAM já disponíveis no mercado. A integração com *softwares* de planejamento da produção também deve ser uma característica de tal sistema CAPP;
- portabilidade: devido ao grande avanço de *hardware* na linha dos PCs, a sua utilização com sistemas mais pesados tem se tornado possível. Novos sistemas CAPP devem estar preparados para rodar em computadores da linha PC.

### **Evolução do sistema de CAPP desenvolvido no Grima**

Com o objetivo de promover a integração entre as atividades do ciclo produtivo, nota-se a necessidade de desenvolvimento de alguns sistemas que foi proposto por Rezende (1996) e que deveriam ser integrados ao sistema desenvolvido. Rezende (1996) sugere os seguintes trabalhos a fim de minimizar as limitações do sistema desenvolvido:

1. geração de planos de processo por lote de peças: o sistema desenvolvido gera planos de processo para uma única peça. Seria bastante interessante desenvolver um sistema que, utilizando o plano para uma peça, gerasse um plano otimizado para um lote de peças.
2. ligação do sistema CAPP com um sistema CAM: o trabalho de Rezende (1996) dá atenção especial à ligação CAD/CAPP. A ligação CAPP/CAM é de grande importância para a automatização da produção. Seria necessário o desenvolvimento de módulos de seleção de condições de corte, determinação de sobre-metais, etc. Alguns trabalhos neste sentido, já foram desenvolvidos, como o apresentado por Gu e Zhang (1994), mas novas propostas seriam bem-vindas.
3. adaptação a outros domínios: a verificação da validade do modelo apresentado neste trabalho foi baseada em uma célula específica de manufatura. Seria muito interessante que fossem levantadas estratégias utilizadas em outros domínios (peças com maior precisão, geometrias mais variadas, etc), no sentido de criar uma biblioteca de bases de conhecimento associadas a estratégias freqüentemente utilizadas. Tal biblioteca poderia ser utilizada no momento da adaptação do sistema a uma nova célula.
4. verificação automática da consistência de regras: os resultados apresentados por um sistema especialista dependem diretamente da qualidade de sua base de conhecimento. A verificação da consistência das regras que compõem tal base de conhecimento é ponto fundamental na garantia de sua qualidade. Para que não seja necessária a realização de testes exaustivos, pode-se pensar no desenvolvimento de uma metodologia que permita a verificação automática da consistência das regras.
5. geração de planos de processo *on-line*: os planos de processo gerados neste trabalho são *off-line*. Para que seja possível gerar planos *on-line*, a ligação do sistema CAPP com um sistema de planejamento da produção é fundamental. A literatura apresenta trabalhos neste sentido: Zhang (1993), Kanumury e Chang (1991) e Cho *et al* (1994), mas uma solução definitiva ainda não foi apresentada.
6. análise de manufaturabilidade prévia: Não são raros os casos em que um projeto é detalhado sem levar em consideração a sua fabricação. Muitas vezes são necessárias modificações de última hora, nas especificações, para que o projeto se torne factível. Uma análise prévia da manufaturabilidade de um componente (ainda durante a fase de projeto) poderia agilizar bastante a produção. Um trabalho neste sentido se utilizaria do plano de processos gerado, para verificar se os recursos presentes na empresa são suficientes para realizar as operações necessárias e caso não sejam, modificações poderiam ser sugeridas. A literatura apresenta alguns trabalhos nesta área (SHAH *et al*, 1990), mas muito desenvolvimento ainda se faz necessário.

Muitas idéias implementadas neste sistema bem como a experiência adquirida pelo Grima poderão ser utilizados na definição da metodologia e da arquitetura do sistema a ser desenvolvido na tese do doutorando Alberto J. Álvares. Estas idéias estão principalmente associadas às *features* de projeto e seu mapeamento em *features* de manufatura/fabricação e a utilização de regras de produção, que certamente terão uma contribuição por parte do trabalho de mestrado de Rezende (1996), apresentado de forma resumida neste capítulo como parte da revisão bibliográfica.

O conceito de *features* padronizadas não foi utilizado neste trabalho pois trabalhou-se com as *features* que a empresa já fazia uso. No trabalho de tese deve-se levar em consideração a padronização de *features* definida pelas normas STEP que já foram abordadas no capítulo anterior. Outra fonte de definição de *features* é a proposta pela empresa DEERE & COMPANY, MOLINE ILLINOIS (BUTTERFIELD *et al*, 1980) que apresenta uma descrição de *features* para utilização em planejamento do processo, que também poderá ser utilizado com referência para definição das *features* de forma a serem utilizadas no futuro sistema a ser desenvolvido na tese.

## 6.4 Seicos Sigma $\Sigma$ 10L Multi Control

Este é um *software* integrado aos CNCs<sup>4</sup> de centros de torneamento da Hitachi Seiki que consiste em uma interface gráfica (*front end*) com o usuário para realizar as atividade de planejamento do processo baseado em *features* de projeto, fazendo-se a entrada de dados da geometria da peça bruta e da geometria final da peça. Realiza-se a modelagem da peça a ser usinada diretamente no *front end* oferecido pelo CNC e tendo como entrada de dados um CAD baseado em *features*. O sistema executa os seguintes passos para realizar as atividades de planejamento do processo até a geração do programa em código G:

- entrada de dados do material e da geometria da peça bruta (manual);
- entrada da forma final da peça através de *features* (manual);
- seleção dos processos de usinagem em relação ao dispositivos de fixação (manual);
- determinação automática dos processos de usinagem e área de usinagem;
- determinação da seqüência de usinagem de forma automática;
- seleção automática das ferramentas;
- determinação da localização da ferramenta no magazine de forma automática;
- determinação das condições de corte de forma automática;
- determinação de restrições de ferramental levando em conta interferências no o sistema máquina/ peça/dispositivo de fixação/ferramenta;
- determinação do caminho da ferramenta;
- geração do código G.

A partir da entrada da forma da peça bruta e da peça acabada o sistema determina o plano de processo e gera o programa de comando numérico para a máquina. Esta abordagem trabalha com o sistema de CAPP na própria máquina sendo interessante para aplicações em ferramentaria e em pequenas e médias empresas que não possuem uma área de engenharia industrial bem estruturada. Neste caso existe uma integração entre CAD/CAPP/CAM orientada a máquina. Maiores informações podem ser obtidas em: Seicos Sigma <ftp://omega.enm.unb.br/pub/disco1/www.hitachiseikiusa.com/controls/>.

---

<sup>4</sup>Este CNC é na realidade um computador industrial baseado na arquitetura PC.

## Capítulo 7

# Lógica de Decisão em CAPP Generativo

Num sistema CAPP generativo, a lógica de decisão do sistema é o coração do software e direciona o fluxo do programa (FERREIRA, 1996). A lógica de decisão determina como um processo é selecionado. A decisão mais importante da lógica de decisão é combinar as capacidades dos processos com as especificações de projeto. Capacidades de processo podem ser descritas como regras do tipo “*IF...THEN...*”. Tais regras podem ser armazenadas sob a forma de sentenças em um simples programa ou em *kernel* de sistema especialista como o CLIPS e FUZZYCLIPS (REZENDE, 1996).

Existem vários métodos para descrever a estrutura de decisão no planejamento do processo. Os métodos de representação do conhecimento relacionam-se diretamente à lógica de decisão nestes sistemas. A seguir serão discutidos os seguintes métodos de lógica de decisão no planejamento do processo: árvores de decisão, tabelas de decisão e técnicas baseadas em inteligência artificial destacando-se os sistemas especialistas, lógica difusa, redes neurais, sistemas multi-agentes e algoritmos genéticos (WANG e LI, 1991).

### 7.1 Árvores de Decisão

Uma árvore de decisão é uma maneira natural de representar informações sobre o planejamento do processo. Condições (IF) são colocadas nos ramos da árvore, e ações pré-determinadas podem ser encontradas na junção de cada ramo. As figuras 6.6 e 6.5 do capítulo anterior apresentam duas árvores de decisão para seleção de operações de mandrilamento e operações de torneamento para perfil interno e externo. Esta técnica foi muito utilizada na implementação de CAPP generativo até a década de 80, como o TECHTURN (HUANG, 1988). Uma árvore de decisão pode ser implementada como um código de computador ou como dado:

#### 7.1.1 Código de Computador

Quando implementada como código de computador a árvore pode ser diretamente mapeada num fluxograma. A raiz corresponde ao nó inicial e cada ramo corresponde a um nó de decisão. A cada junção um conjunto de ações é incluído para a condição verdadeira. Para uma condição falsa, um outro ramo pode ser tomado ou o processo pode ser direcionado para o fim do bloco lógico. A figura 7.1 apresenta esta implementação e a árvore escrita no formato de uma “pseudo-linguagem”.

Figura 7.1 - Implementação árvore de decisão em um programa.

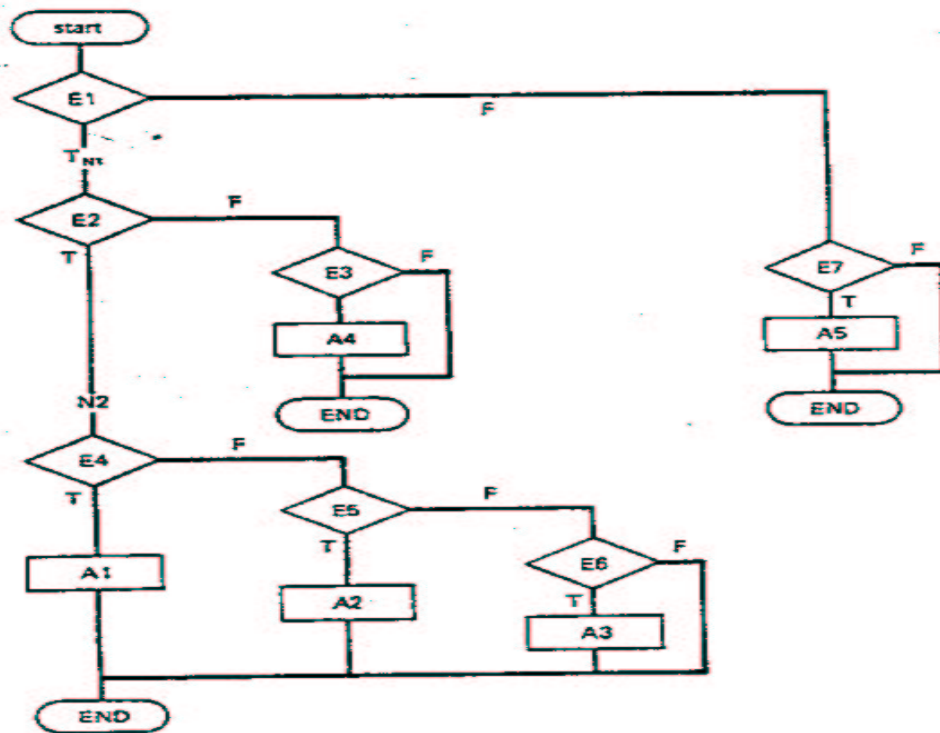
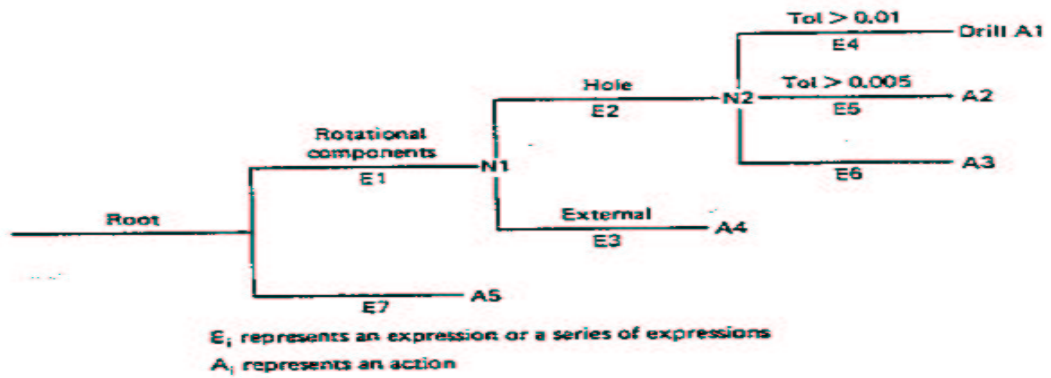


Figura 7.1: Implementação árvore de decisão em um programa.



### 7.1.2 Dados

Quando implementado na forma de dados um outro programa é necessário para interpretar os dados e caminhar ao longo da árvore de decisão. Existem alguns métodos que podem ser usados para projetar tal sistema. Um exemplo simples irá ilustrar o seu uso a seguir.

O sistema será chamado de DCTREE e utiliza um sistema de consulta (*query*) para obter informações de projeto e então imprimir as conclusões finais. No DCTREE existem os seguintes componentes:

1. os dados da árvore de decisão: é fornecido pelo usuário, que traduz uma árvore de decisão na forma de um grafo, para o formato da linguagem DCTREE.
2. um módulo de execução: lê a árvore de decisão e a seguir gera as perguntas, toma decisões e imprime as conclusões.

A árvore é representada por identificadores de expressão e ponteiros. Por exemplo, uma seta representa “apontar para”. A sintaxe é:

$$E_{no} \rightarrow [E/OU] (E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{n3}) || A_i$$

onde:  $E_{no}$  = raiz

$E_{ni}$  = número da expressão (ação ou destino)

$A_i$  = ação de execução

|| = ou E's ou A's, mas não ambos.

## 7.2 Tabelas de Decisão

Tabelas de decisão podem ser facilmente implementadas num computador. Entretanto, quando sistemas de CAPP as usam é necessário um programa de pré-processamento para implementar a tabela e controlar a operação da tabela. Tal *software* é chamado de linguagem de tabela de decisão. Este *software* consiste de uma tabela de decisão e um programa externo.

A tabela de decisão é representada no seu formato original, podendo trabalhar com uma tabela de decisão a partir da representação através de árvore de decisão e vice-versa. A figura 7.2 apresenta uma representação através de árvore de decisão e tabela de decisão.

O programa externo é utilizado para controlar a tabela de decisão. Chamando este exemplo de DCTABLE, uma sub-rotina (TAB(N)) avalia a tabela N. Durante ou após a análise da tabela, um TAB(N<sub>1</sub>) pode ser adicionado à tabela N, que significa que várias tabelas podem ser conectadas. Para a consulta à tabela para seleção de um processo ou operação de usinagem pode-se utilizar como dados de entrada a forma, diâmetro, tolerância de posição e tolerância dimensional.

Uma outra forma de implementar um processo de lógica de decisão baseado na abordagem de tabela de decisão é utilizar a tecnologia de base de dados relacionais. Existem diversos sistemas de gerenciamento de bases de dados relacionais gratuitos e que podem ser usados para esta finalidade como o MSQL e o MySQL (database ftp://custom.lab.unb.br/pub/database), tanto para plataforma Unix como Windows.

## 7.3 Inteligência Artificial

Ferramentas emergentes de Inteligência Artificial (AI) como redes neurais, lógica difusa, algoritmos genéticos, sistemas especialistas, etc, oferecem novas oportunidades e abordagens para resolver complexos problemas associados a elaboração automática de planos de processo (DÉPINCE, AMARA e HASCOËT, 1999). A maioria dos métodos utilizados na pesquisas de CAPP são baseados em lógica difusa ou um mix de métodos usando redes neurais, lógica difusa e sistemas especialistas. Algumas aplicações de algoritmos genéticos podem ser achadas. Atualmente as técnicas de AI são usadas em funções específicas como seleção de ferramentas de corte, seqüenciamento das operações, reconhecimento de padrões, etc.

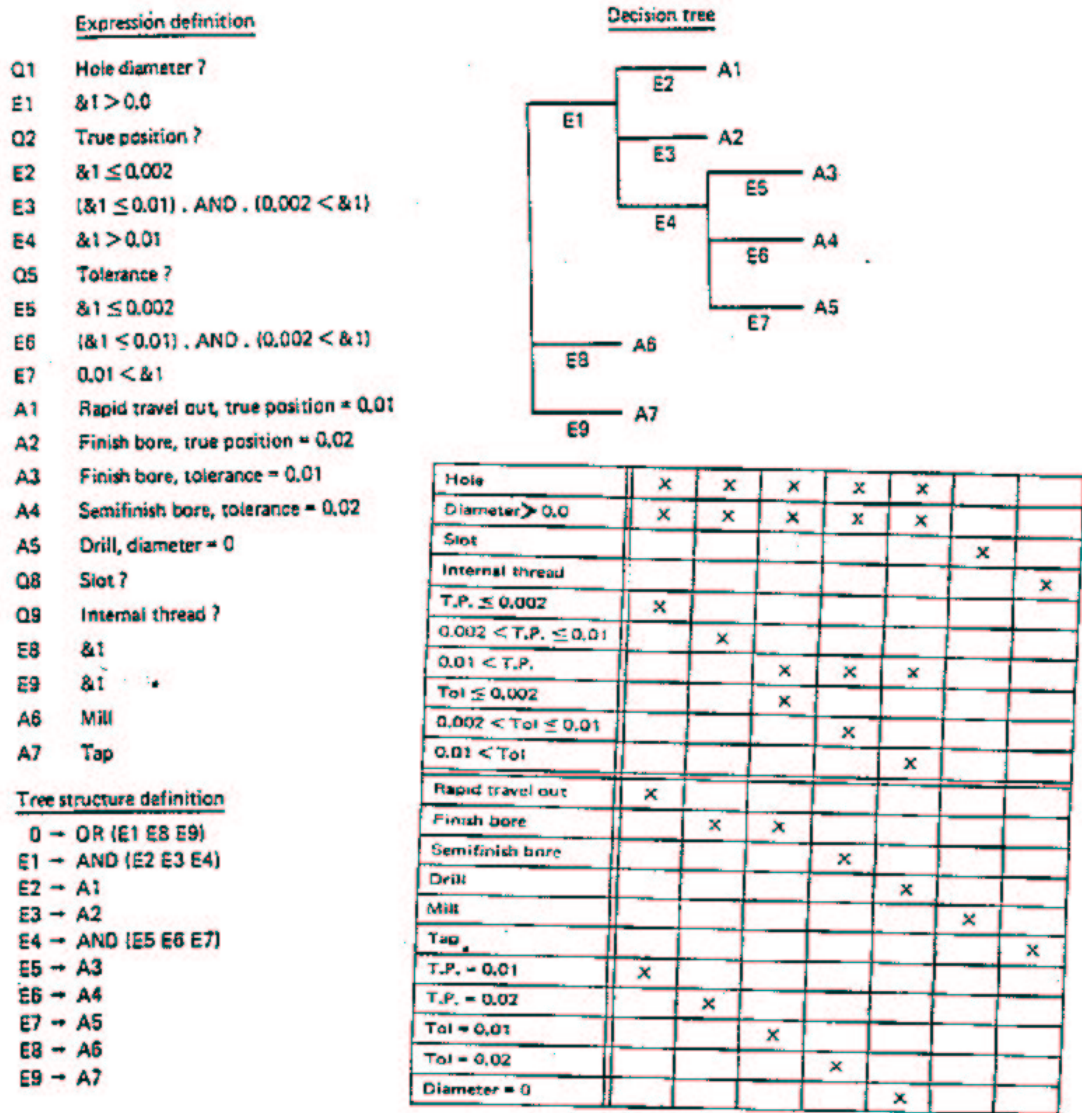


Figura 7.2: Representação através de árvore de decisão e tabela de decisão para o mesmo problema.

O uso de técnicas de AI em planejamento do processo tem destacado a necessidade de se ter a ferramenta certa aplicada no domínio do problema. Algumas técnicas como algoritmos genéticos ou lógica difusa podem tratar com planos de processos contendo alternativas gerando planos de processo não lineares. Os próximo desenvolvimento de sistema de CAPP é a integração de técnicas de AI dentro do campo de inteligência artificial distribuído, como em um arquitetura computacional baseada em Agentes (DÉPINCÉ, AMARA e HASCOËT, 1999). Neste caso as atividades são distribuídas através de múltiplos resolvidores de problemas especializados, ou seja o Agente.

Hashmi *et al* (1998) desenvolveu uma aplicação para seleção das condições de usinagem utilizando-se da abordagem baseada em lógica difusa. No modelo *fuzzy* desenvolvido dados de materiais (dureza) são os dados de entrada e a velocidade de corte é a variável de saída. Um conjunto fuzzy para a variável fuzzy de entrada (Dureza) e para a variável fuzzy de saída (Velocidade) são utilizados consistindo dados de três diferentes profundidades de corte, quatro tipos de ferramentas e dois tipos de materiais com durezas distintas e as faixas de velocidade de corte recomendadas para cada material.

À variável *fuzzy* Dureza é associado ao seguinte conjunto *fuzzy*: *muito mole, mole, médio, médio superior, duro e muito duro*.

A variável *fuzzy* Velocidade é associado ao conjunto *fuzzy*: *muito baixa, baixa, média baixa, média alta, alta e muito alta*.

A regras no total de seis são estabelecidas, como: “Se dureza do material é muito *mole*, então a velocidade é *muito alta*”.

Um forma triangular foi empregada para descrever o conjunto fuzzy. Hashmi *et al* (1998) conclui o estudo indicando que existe uma boa correlação entre os dados utilizados de velocidade de corte recomendados pelo *Machining Data Handbook* e os valores de velocidade previstos pelo modelo em *fuzzy logic*.

Desde 1995, uma nova abordagem tem despontado no planejamento do processo: inteligência artificial distribuída (DAI). O uso de sistemas distribuídos tem mostrado que a inteligência distribuída melhora a eficiência do processo de decisão. Em sistemas distribuídos, também chamados de sistemas cooperativos, o problema original é decomposto em sub-problemas e cada sub-sistema especialista é responsável por uma tarefa específica. Em um único sistema, diferentes fontes de conhecimento coexistem e DAI permite o gerenciamento evitando os conflitos devido às várias formas de representação de conhecimento utilizadas. No final as soluções parciais criadas pelos sub-sistemas são colocadas juntas, de forma ordenada, para obter uma solução global. As característica de um sistema cooperativo são:

- tem boa capacidade de adaptação;
- é modular;
- é flexível;
- é rápido devido ao processamento paralelo dos sub-sistemas;
- permite que múltiplas abordagens heterogêneas trabalhem juntas;
- pode colecionar conhecimento.

Diferentes aplicações baseadas em sistemas cooperativos podem ser achados na literatura sob variados nomes: sistemas multi-agentes (MAS), sistemas baseados em quadonegro (*black-board*), resolvidores de problemas cooperativos e distribuídos, entre outros.

Outra vantagem de técnicas de DAI é a possibilidade de integrar o usuário na malha de decisão: de maneira a controlar e disparar os subsistemas especialistas por meio de três maneiras: orientado ao usuário, orientado pelo cenário e disparo automatizado.

### 7.3.1 Abordagem através de sistemas multi-agentes (MAS)

Em Dépincé *et al* (1999) é apresentada uma arquitetura para CAPP generativo baseada na representação multi-agentes. MAS distribui as atividades de planejamento do processo para múltiplos agentes especializados e coordena-os de maneira a obter a solução global. O uso de MAS tem mostrado que a inteligência distribuída melhora a eficiência do processo de decisão, sendo que cada agente tem seu próprio conhecimento e é responsável por uma tarefa específica. Um agente é uma entidade que pode atuar em um ambiente, comunicar-se com outros agentes e cujo o comportamento é resultado de suas observações, conhecimento e interação com outros agentes. Um agente pode ser usado para o modelo de dados (máquinas, ferramentas, dispositivos, etc), como um supervisor, funções matemáticas ou um humano.

A arquitetura proposta é composta por três módulos:

1. Modulo supervisor: permite a troca de informações entre os agentes e contém as informações sobre o planejamento do processo e critérios usados durante o processo de otimização de um plano de processos.
2. Interface humana: permite que o usuário interaja com o sistema. Mostra os estágios de progresso do planejamento do processo em execução. O usuário pode questionar e revisar as informações geradas pelos agentes e compartilhadas com o módulo supervisor.
3. Modulo de agentes: representa o conjunto de agentes, onde cada agente esta associado com uma aplicação que executa uma tarefa específica da elaboração de um plano de processo. Suas atividades são programadas pelo módulo supervisor ou pelo usuário do sistema. Os agentes são associados à:
  - seleção dos processos de usinagem tendo como entrada as *features* de projeto disponíveis em uma base de dados (biblioteca de *features*); e as restrições são associadas as dimensões, tolerâncias, material da peça, entre outras.
  - seleção de máquinas-ferramenta tendo como entrada os processos de usinagem; e as restrições são a geometria da máquina, potência da máquina, capacidade da máquina, dimensões da peça, entre outros.
  - seleção da ferramenta de corte tendo como entrada as máquinas-ferramenta; e as restrições são o tipo de material do par peça/ferramenta, dimensões e geometria das ferramentas, vida da ferramenta, entre outras.
  - condições de corte tendo como entrada os parâmetros das ferramentas e material; e as restrições são os critérios utilizados como vida de ferramenta, econômicos, potência da máquina, entre outros.
  - trajetória da ferramenta tendo como entrada o modelo do produto baseado em *features*; e as restrições baseada nas próprias *features* e eixos das ferramentas para evitar colisões.

### 7.3.2 Sistemas especialistas

O planejamento dos processos de fabricação tem uma característica bastante peculiar: não existe um algoritmo predefinido para a geração dos planos de processo. Assim, se faz necessária a utilização de uma metodologia de programação especialmente voltada para a solução de problemas desta natureza. A tecnologia de sistemas especialistas se apresenta como uma alternativa bastante atrativa.

A utilização de sistemas especialistas de forma comercial é bastante recente (teve seu começo na década de 80), mas, de acordo com Waterman (1986), pesquisas são desenvolvidas desde a década de 60. Os sistemas especialistas constituem um ramo importante da inteligência artificial. Nos tópicos que seguem apresenta-se uma introdução à teoria de sistemas especialistas.

### O que são sistemas especialistas

De acordo com a definição apresentada em Giarratano e Riley (1994) sistemas especialistas são programas de computador que se utilizam de conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas bastante complexos que necessitam, para a sua solução, de um conhecimento bastante específico.

Neste sentido, pode-se dizer que sistemas especialistas são *softwares* que procuram imitar a forma de raciocínio de um especialista no assunto, para a solução de um determinado problema.

Pelo fato dos sistemas especialistas se utilizarem de uma base de conhecimento para a solução de problemas, os termos sistemas baseados no conhecimento e sistemas especialistas baseados no conhecimento são muitas vezes utilizados como sinônimos de sistemas especialistas, embora não restrinjam o conhecimento utilizado ao obtido de um especialista no assunto. Assim, o termo sistema especialista é utilizado, atualmente, para se referir aos sistemas baseados em conhecimento, mesmo que este tenha sido obtido a partir de livros e revistas que lidam com o assunto em questão.

Como apresentado em Waterman (1986), os sistemas especialistas são constituídos por duas partes distintas, quais sejam:

- uma base de conhecimento;
- um motor de inferência.

A base de conhecimento, por sua vez, é dividida em duas partes:

- dinâmica: é a base de dados (fatos) sobre a qual o sistema trabalha;
- estática: é o conhecimento que o sistema tem a respeito das relações entre os fatos;

O motor de inferência também é dividido em duas partes básicas, quais sejam:

- interpretador: promove a ligação das partes estática e dinâmica da base de conhecimento;
- controlador: rege o funcionamento do interpretador, no sentido de controlar a ordem em que este estabelece as ligações da base de conhecimento.

### Formas de representar o conhecimento

Diferentes formas podem ser utilizadas para representar uma base de conhecimento. A seguir, apresenta-se a forma mais comum de representar as partes estática e dinâmica de uma base de conhecimento:

- conhecimento dinâmico: é geralmente representado por fatos do tipo: A peça tem um furo.
- conhecimento estático: a forma mais difundida de se representar o conhecimento estático, em um sistema especialista, é através de regras do tipo IF THEN. Uma possível regra seria:

⇒Se

“A peça tem um furo”

⇒Então

“**Deve haver uma operação de furação**”. O novo fato “Deve haver uma operação de furação” é gerado, pela regra acima, quando o fato “A peça tem um furo” estiver presente na base de fatos. Aos fatos que servem de base para o disparo de uma dada regra dá-se o nome de premissa da regra, aos que são gerados quando a regra é executada dá-se o nome de conclusão da regra.

Uma forma mais recente e bastante eficiente, apresentada por Giarratano e Riley (1994), de se representar o conhecimento é a utilização de classes para modelar um sistema. Neste tipo de representação, os fatos são substituídos pelos atributos dos objetos de cada classe. As regras (conhecimento dinâmico) passam então a atuar sobre os atributos dos objetos. O novo modelo seria assim representado:

**Classe: Furo**

- Diâmetro:
- Profundidade:
- Operações:

Um possível objeto pertencente à classe furo teria os atributos:

- Diâmetro: 10 mm
- Profundidade: 50 mm
- Operações: vazio.

Como exemplo de uma regra que atuaria sobre este objeto, tem-se:

⇒ Se

existe um objeto da classe furo com:

Diâmetro = D

Profundidade = P

⇒ Então

associe ao atributo Operações deste objeto uma operação de Furar com Diâmetro = D e Profundidade = P.

O objeto passaria a ter então, os seguintes valores:

- Diâmetro: 10 mm
- Profundidade: 50 mm
- Operações: Furar, Diâmetro = 10 mm, Profundidade = 50 mm.

**Como funciona um sistema especialista**

O funcionamento de um sistema especialista depende da forma como é utilizado. Pode-se utilizar um sistema especialista como um sistema simulador ou como um sistema que analisa a veracidade de hipóteses.

Quando utilizado como um simulador tem-se o que se chama de encadeamento para frente (*forward chaining*). Quando utilizado para analisar a veracidade de hipóteses tem-se o que se chama de encadeamento para trás (*backward chaining*).

**Um sistema especialista realizando encadeamento para frente** O encadeamento para frente é adequado para determinar quais são as conseqüências de um dado fato ocorrido em um dado sistema.

Seu funcionamento pode ser descrito com base nas relações existentes entre os elementos que o constituem. O interpretador fica continuamente monitorando a base de fatos e a base de regras com o objetivo de construir uma lista (agenda) das regras que têm suas premissas satisfeitas pelos fatos já existentes. Uma regra que seja colocada no topo da agenda será a primeira a ser executada. A ordem em que as regras são colocadas na agenda e a sua execução são ditadas pela estratégia adotada pelo controlador.

Dentre as estratégias comumente utilizadas por um controlador pode-se citar: execução em largura e em profundidade.

Suponhamos que duas regras R1 e R2 tenham suas premissas satisfeitas por um fato A, presente na base de fatos. Estas regras são então colocadas na agenda. A execução da regra R1 leva à criação do fato B, que satisfaz à regras R3 e R4. Estas regras (R3 e R4) são agora colocadas na agenda. Se R3 e R4 são colocadas acima de R2, então tem-se uma execução em profundidade. Se R3 e R4 são colocadas depois de R2, então tem-se uma execução em largura.

**Um sistema especialista realizando encadeamento para trás** O encadeamento para trás é adequado para determinar quais são as causas que levaram a um dado fato, em um dado sistema, ou simplesmente para verificar se uma determinada hipótese se sustenta, com base nos fatos já conhecidos.

Neste caso as relações entre os elementos que constituem o sistema especialista são diferentes daquelas presentes no encadeamento para frente. O interpretador recebe um fato (uma hipótese que deve ser provada) e verifica se este já existe na base de fatos. Se sim, então a hipótese é imediatamente provada. Se não, então o interpretador verifica na base de regras quais as regras que têm como conclusão aquele fato. Os fatos que estão nas premissas dessas regras passam então, a ser hipóteses intermediárias que devem ser provadas. O processo se encerra quando um fato presente na base de fatos dá suporte ao raciocínio desenvolvido, ou quando não há mais caminhos para tentar provar a hipótese.

Por exemplo, deseja-se verificar se a hipótese H0 pode ser provada com base nos fatos já existentes (fig. 7.3). De acordo com a base de regras, se um dos fatos H1, H2 ou H3 for verdade então H0 será provada. Procura-se então provar pelo menos uma das hipóteses intermediárias H1, H2 ou H3.

Para que H1 seja provada é necessário que o fato A exista, o que, neste caso não acontece. Então este caminho não prova a hipótese inicial (H0).

Para que H2 seja provada é necessário que as duas hipóteses intermediárias (H4 e H5) sejam simultaneamente provadas. Para que H4 seja provada é necessário que exista o fato B, o que realmente acontece, e portanto H4 é verdade. Mas ainda resta provar H5, que depende da existência dos fatos C e D. Embora exista o fato D, o fato C não está presente e portanto H5 não pode ser provada. Assim H2 também não pode ser provada e novamente tem-se um caminho que não prova a hipótese inicial (H0).

Resta então tentar provar H3. Para que H3 seja provada é necessário que a nova hipótese intermediária H6 seja provada. Para que H6 seja provada é necessário que existam simultaneamente dois fatos: D e E. Os fatos D e E estão presentes na base de fatos e conseqüentemente H6 é verdade. Sendo H6 uma verdade, H3 também o é, e segue-se que a hipótese inicial (H0) é verdadeira.

### **Campo de aplicação de sistemas especialistas**

Sistemas especialistas são indicados para resolver problemas que não tenham solução algorítmica, quando se consegue expressar o conhecimento sobre o sistema através de regras. Sendo assim, os sistemas especialistas se diferem dos sistemas convencionais em um ponto básico: o controle sobre o fluxo de execução. Os sistemas convencionais apresentam uma programação procedural, onde a seqüência de execução é um aspecto importante que deve ser previamente definido. Já nos sistemas especialistas não há uma preocupação, por parte do construtor do sistema, com a

seqüência de execução, pois esta é indiretamente definida através das regras e dos fatos presentes no sistema.

Os sistemas especialistas são dependentes de uma base de conhecimento criada a partir das regras. A criação de bases de conhecimento para um domínio amplo hoje ainda não é uma realidade, devido às dificuldades encontradas em se aglomerar e manipular diferentes áreas de conhecimento. O caminho mais utilizado, atualmente, é a construção de bases de conhecimento para um domínio bastante restrito.

Desta forma, o campo de aplicação dos sistemas especialistas passa a ser o dos sistemas com domínios reduzidos sobre os quais se pode expressar o conhecimento na forma de regras, quando um algoritmo não é adequado ou simplesmente não existe para a solução do problema.

### Vantagens da utilização de sistemas especialistas

Os sistemas especialistas apresentam uma série de características positivas, dentre as quais pode-se citar:

- disponibilidade: uma vez construído, o sistema estará disponível em qualquer computador que seja adequado à sua execução;
- custo reduzido: o custo de desenvolvimento quando dividido pelo total de usuários pode ser bastante atrativo;
- permanência: ao contrário de especialistas humanos, um sistema especialista não morre e portanto o seu conhecimento é permanente;
- regularidade: o funcionamento de um sistema especialista não será afetado pelo cansaço nem por problemas emocionais. Assim, numa situação de emergência, onde várias horas de

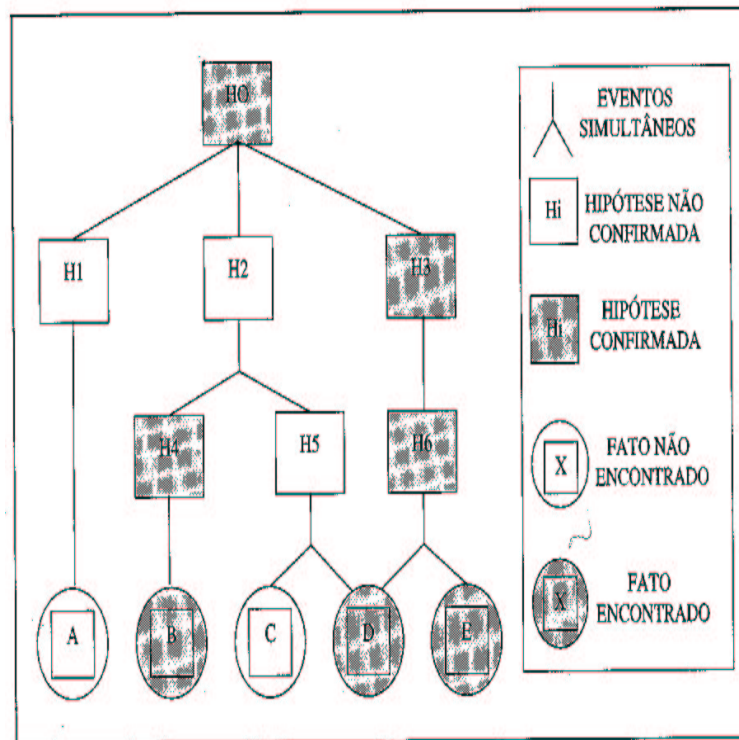


Figura 7.3: Sistema especialista realizando encadeamento para trás para provar uma hipótese ( $H_0$ ).



trabalho sejam necessárias e decisões importantes estejam envolvidas, a utilização de um sistema especialista pode ser bastante interessante;

- descrição da linha de raciocínio: a conclusão a que um sistema especialista chega pode ser explicada através da linha de raciocínio desenvolvida, o que aumenta a confiabilidade da decisão tomada.

Apesar de tantas características positivas, os sistemas especialistas são incapazes de absorver o senso comum, pois este não pode ser descrito em termos de regras. Desta forma, a utilização de um sistema especialista é bastante vantajosa quando se pensa no seu uso em conjunto com um especialista no assunto. O sistema especialista trabalha então, no sentido de fazer sugestões que podem ser ou não aceitas por um humano.

### Representação do conhecimento

O conhecimento em ES deve ser representado num computador numa forma implementável. A representação do conhecimento é uma combinação de estruturas de dados e rotinas interpretativas. Esquemas de representação são classificados em declarativos e procedurais (WANG e LI, 1991).

#### Conhecimento Declarativo

- Cálculo Predicativo: a descrição do mundo é dada neste esquema em termos de sentenças lógicas. Por exemplo, o fato de que “todos os furos são cegos” é representado por:  $\forall X (furo\_cego(X) \Rightarrow furo(X))$ .
- Redes Semânticas: foram desenvolvidas como um modelo psicológico explícito para a memória associativa humana, descrevendo o mundo em termos de objetos (nós) e relações (arestas rotuladas). O conhecimento é uma coleção de objetos e associações são representadas como um grafo rotulado direcionado.
- *Frames*: é uma estrutura de dados utilizada para representar uma situação convencional. Atrilada a cada *frame* existem vários tipos de informação: como usar a *frame*, o que deve-se esperar que ocorrerá depois, o que fazer se estas expectativas forem confirmadas, etc.

#### Conhecimento Procedural

- Regras de Produção: foram desenvolvidas para modelagem do conhecimento humano, elas têm se tornado cada vez mais populares em grandes programas. A idéia básica destes sistemas é que a base de dados consiste de regras, na forma de pares condição-ação<sup>1</sup>. É a forma de representação conhecimento utilizada em ES, como descrito anteriormente. Ferramentas de SE como CLIPS, FUZZYCLIPS podem ser encontradas em: <ftp://omega.enm.unb.br/pub/doutorado/disco2/www.ghg.net/clips>.

## 7.4 Qual Modelo de Tomada de Decisão Utilizar ?

A utilização de uma arquitetura baseada em sistemas multi-agentes (MAS) é sem dúvida a mais atrativa atualmente, principalmente devido a evolução dos sistemas computacionais em especial de Unix para computadores pessoais e a utilização de redes de comunicação baseadas no protocolo TCP/IP em uma arquitetura cliente/servidor.

Desta forma pode-se utilizar diversos tipos de agentes trabalhando cooperativamente e de forma distribuída na resolução dos diversos problemas associados ao planejamento do processo. Por exemplo, pode-se utilizar um sistema de gerenciamento de base de dados relacional (MySQL® ou SQL®) para compartilhar as informações dos recursos disponíveis de manufatura (máquinas,

<sup>1</sup> IF <antecedente> THEN <conseqüente>, ou  
WHEN <premissa> BEGIN <ação>.

ferramentas, informações de materiais, dispositivos de fixação, etc) e ter os agentes como os resolvidores das atividades de planejamento do processo. Os agentes podem ser implementados utilizando diversas abordagens na sua lógica de decisão: sistemas especialistas baseado em regras de produção, lógica difusa, redes neurais, tabelas de decisão, entre outros.

## Capítulo 8

# Planejamento do Processo com Alternativas

A chave para a fabricação de qualquer peça é o plano de processo, o qual contém as informações necessárias a fabricação da peça, por exemplo, operações, máquinas, ferramentas de corte, dispositivos de fixação e condições de corte (FERREIRA e WYSK, 2001). O plano de processo para uma peça ou lote deve satisfazer os requisitos de tolerância considerando também o carregamento da máquina e a eficiência do processamento. Assim, planejamento do processo é uma atividade complexa, e no caso de sistemas de manufatura que está sujeito à incertezas de demanda, o planejamento do processo deve ser executado freqüentemente.

Devido aos aspectos dinâmicos do planejamento do processo que influenciam o comportamento do ambiente, cada plano de processo deve conter alternativas para cada operação. Isto é recomendado porque fatores como carregamento excessivo de certas máquinas, mudanças constantes nos produtos, mudanças necessárias no processamento entre lotes de fabricação, entre outros, exigem que se tenha planos/métodos alternativos a fim de melhorar a performance do sistema de manufatura, como uma célula ou um sistema flexível de manufatura. Neste capítulo são apresentadas abordagens baseadas em Grafo E/OU e Redes de Petri.

### 8.1 Razões para Utilização de Planos de Processo Alternativos

A seguir são apresentados os principais motivos para geração de métodos alternativos para fabricar uma peça:

1. Um determinada máquina pode estar em manutenção ou pode estar ocupada fabricando outra peça ou um lote. Uma máquina alternativa pode ser usada reduzindo o tempo de processamento da peça e também o trabalho em processo. Com a disponibilidade de alternativas, no caso de uma falha no chão-de-fábrica, por exemplo quebra de uma máquina, não será necessário refazer o planejamento do processo da peça, pois existe um plano alternativo para fabricação da peça.
2. A indisponibilidade de uma determinada ferramenta de corte no magazine da máquina especificada, pode ser substituída por uma ferramenta alternativa especificada no planejamento do processo com alternativas.
3. O tamanho do lote pode influenciar a escolha da operação; isto é, para pequenos lotes uma certa operação pode resultar em um tempo de fabricação menor, por outro lado para lote com quantidade maior outra operação pode ser mais apropriada para diminuir o tempo de fabricação, até mesmo se operações posteriores necessitarem de *setup* de uma nova ferramenta. Por exemplo, se apenas uma peça está sendo produzida (peça protótipo) a estratégia

mais eficiente é produzir a peça usando um único *setup* de ferramentas no magazine da máquina, se possível. *Setup* de novas ferramentas na máquina demanda mais tempo do que usar as ferramentas disponíveis na máquina, até mesmo é menos eficiente do ponto de vista de usinagem, por exemplo menor velocidade de corte a ser usada.

Wilhelm e Shin (1995) propõem diferentes esquemas para execução de operações alternativas. Utilizaram programação linear para obter os resultados sobre a utilização da máquina e o tempo de ciclo para cada peça. Foram tratadas diferentes peças com vários tamanhos de lote, seqüências e data de entrega.

Kruth e Detand (1992) propõem o uso de Rede de Petri (PNs) para representar planos de processos não lineares. PNs são usadas para representar *features*, operações e máquinas.

Koo e Tanchoco (1999) propõem um método para selecionar operações e ferramentas em um sistema de manufatura totalmente automatizado onde cada máquina executa todas as operações sobre a peça.

Kiritsis e Porchet (1996) propõem uma abordagem baseada em PNs para planejamento do processo dinâmico e seqüenciamento.

Existem diferentes modos de representar planos de processos com alternativas (não lineares), destacando-se:

- Redes de Petri;
- Grafos E/OU;
- Estruturas em árvores;
- gráficos direcionados.

## 8.2 Grafos E/OU (AND/OR)

Grafos E/OU são uma excelente forma de representação de planos de processos com alternativas pois o grafo mapeia com grande refinamento uma estrutura para representar o plano de processo. Um nó AND/E (“&”) significa que todos os caminhos possíveis nos ramos devem ser seguidos, mas a seqüência pode ser qualquer. Por outro lado um nó OR/OU (“|”) significa que um dos caminhos originário deste nó deve ser escolhido. Informações detalhadas são apresentadas em cada nó do grafo (por exemplo: operação, ferramenta, diâmetro da ferramenta e tempo de usinagem) para melhor entendimento do conteúdo do plano de processo. Outras informações podem ser incluídas como fixações e máquinas. A figura 8.1 apresenta um exemplo da representação através de grafos E/OU. Um descrição completa desta abordagem pode ser visto em Ferreira e Wysk (2001).

Este grafos são compostos por nós conectados por arcos e no caso de peças os nós representam as *features* de manufatura (um furo, por exemplo) e os arcos representam as precedências OU/E, ou uma simples seqüência de precedências. Grafos E/OU podem ser armazenados em um arquivo ASCII para representar as peças e os planos de processo. Quando representado através de um arquivo ASCII trabalha-se com uma semântica própria onde os símbolos têm o seguinte significado:

- (S &): símbolo “&” implica relacionamento AND;
- (S |): símbolo “|” implica relacionamento OR;
- (S \*): símbolo “\*” implica que os elementos de S são ordenados seqüencialmente. Por exemplo se N é representado por (N<sub>1</sub> N<sub>2</sub> N<sub>3</sub> \*), então N<sub>1</sub> precede N<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> precede N<sub>3</sub>. A figura 8.2 apresenta um exemplo.

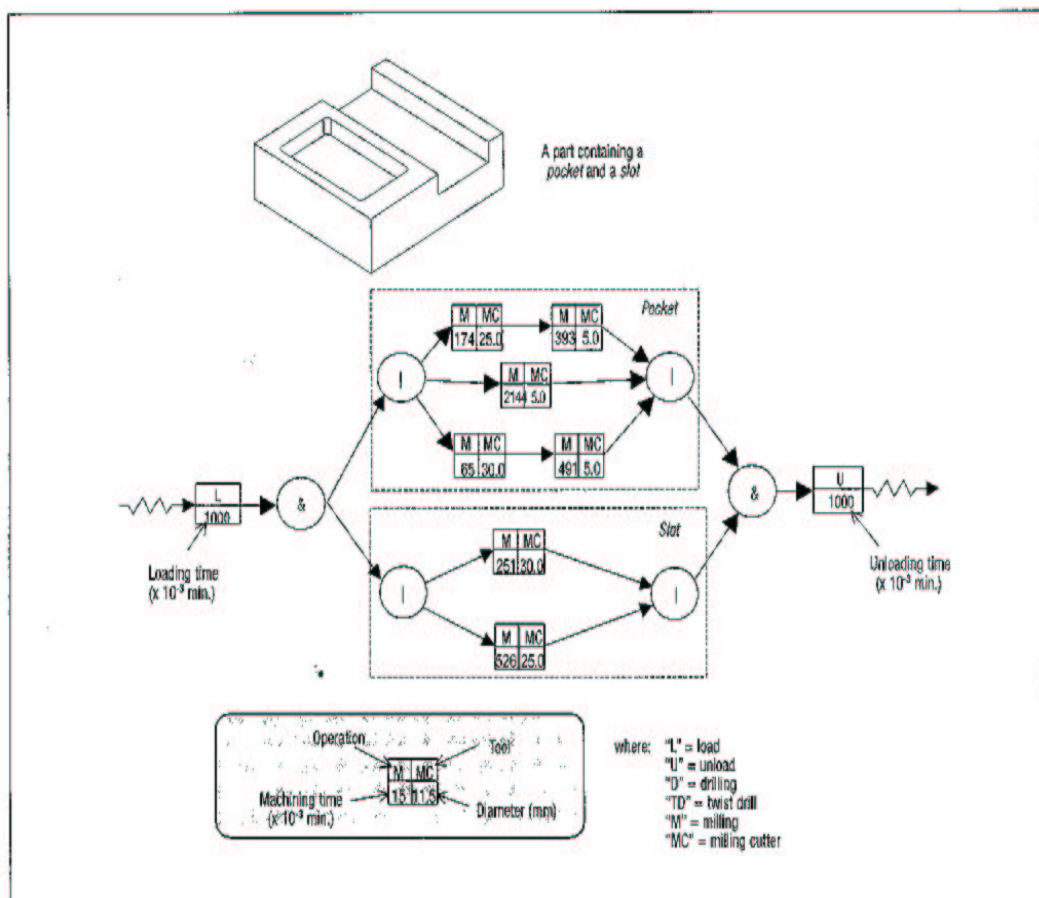
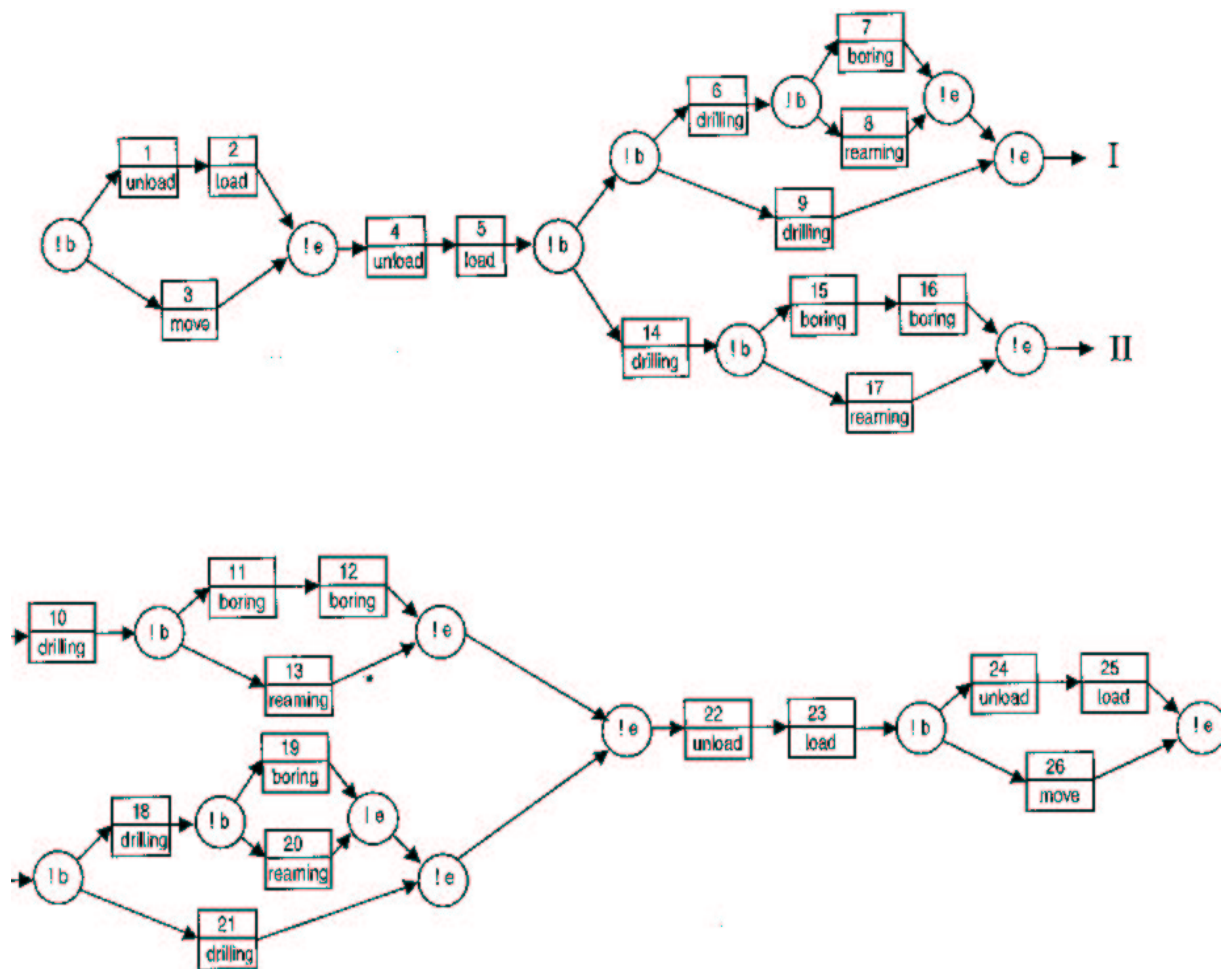


Figura 8.1: Uma peça contendo uma cavidade e um *slot* e o correspondente grafos E/OU.



Process plan string:

```
(((1 2 *) 3 !) 4 5 (((6 (7 8 !) *) 9 !) 10 ((11 12 *) 13 !) *) (14 ((15 16 *) 17 !) (( 18 (19 20 !) *) 21 !) *) !) 22 23 (( 24 25 *) 26 !) *)
```

Figura 8.2: Grafos E/OU e a representação através de arquivo ASCII com a semântica associada.

## 8.3 Redes de Petri

A representação de planos de processos não lineares por PNs, normalmente utiliza-se de métodos que realizam as seguintes ações, conforme descrito por Kiritsis e Porchet (1996):

- monta-se uma tabela (tabela de usinagem) onde as operações de usinagem estão associadas com as entidades de projeto (superfícies e *features* de manufatura) e os relacionamentos de precedência são estabelecidos;
- constrói-se a PNs baseados nos dados da tabela de usinagem;
- determina-se na PNs todas as possíveis soluções dos planos de processos construindo um grafo de exequibilidade representando todas as possibilidades.
- aplica-se um método heurístico para reduzir o tamanho do grafo de exequibilidade e determina-se a solução ótima.

A PNs consistem de lugares e transições as quais são conectadas uma a outra através de arcos direcionados, com alguns arcos direcionados de lugares para transição (arco de entrada), e alguns arcos direcionados de transições para lugares (arcos de saída). Uma PNs pode ser descrita como um grafo direcionado bipartido no qual os nós são um conjunto de lugares e um conjunto de transições.

Lugares representam componentes passivos do sistema no qual os *tokens* são armazenados e representam um estado particular. Graficamente lugares são representados por círculos. Transições representam os componentes ativos do sistema que podem produzir, transportar ou mudar os *tokens*. Para cada transição existe um conjunto de lugares de entrada e um conjunto de lugares de saída. Graficamente, transições são representadas por retângulos.

Arcos conectam lugares com transições e representam o relacionamento entre eles. A marcação da PNs é a posição dos *tokens* na rede em qualquer instante no tempo. Uma dada marcação da PNs define quais transições são capazes de iniciar em qualquer tempo. O disparo de uma transição move a rede para uma nova marcação.

### 8.3.1 Modelagem do Planejamento do Processo Através de PNs

As seguintes regras são aplicadas para a modelagem do planejamento do processo a partir da abordagem de PNs para operações a serem processadas em uma única máquina com mesa de fixação de peça indexada (centro de usinagem com mesa indexada):

1. Cada operação de usinagem é representado por uma transição  $T_i$  ( $i=1, \dots, n$ ).
2. Operações de usinagem alternativas para uma *features* são representadas por transições  $T_{ij}$  usando o mesmo lugar de entrada e saída.
3. Existem um lugar (ControlPlace) de entrada/saída comum com um *token* inicial (marcação inicial) para todas as transições representando: (a) as soluções do estado de peça em processamento (o estado depois que cada transição/operação de usinagem é disparada) e (b) a evolução do estado da máquina-ferramenta (ferramenta e posição da mesa indexada em graus).
4. Para cada transição  $T_i$  é criado um lugar de saída sem transição sucessora. Este lugar-fim  $EP_i$ , após receber um *token* da transição correspondente faz o disparo indicando que esta transição tem realmente sido disparada e não pode ser disparada novamente.
5. Para cada transição sucessora  $T_m$  de uma transição  $T_i$  é criado um lugar de saída  $CP_{im}$  de  $T_i$  o qual é um lugar de saída para a correspondente transição sucessora  $T_m$ . Este tipo de lugar representa o tipo de conhecimento dado por uma precedência de relacionamento de restrição.

6. Todos os arcos tem peso um.

A figura 8.3 apresenta a modelagem baseada em PNs para o planejamento do processo.

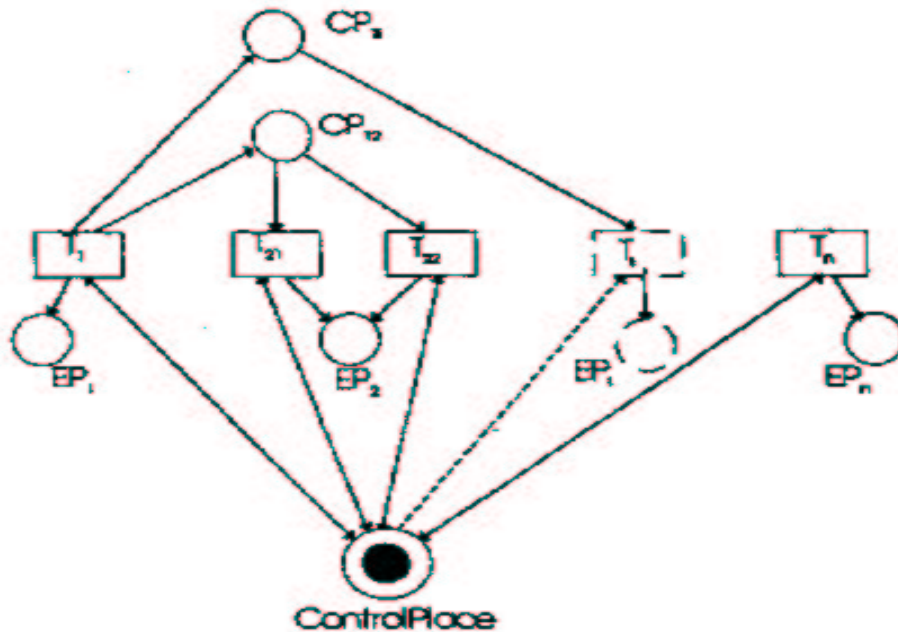


Figura 8.3: Modelagem por PNs.

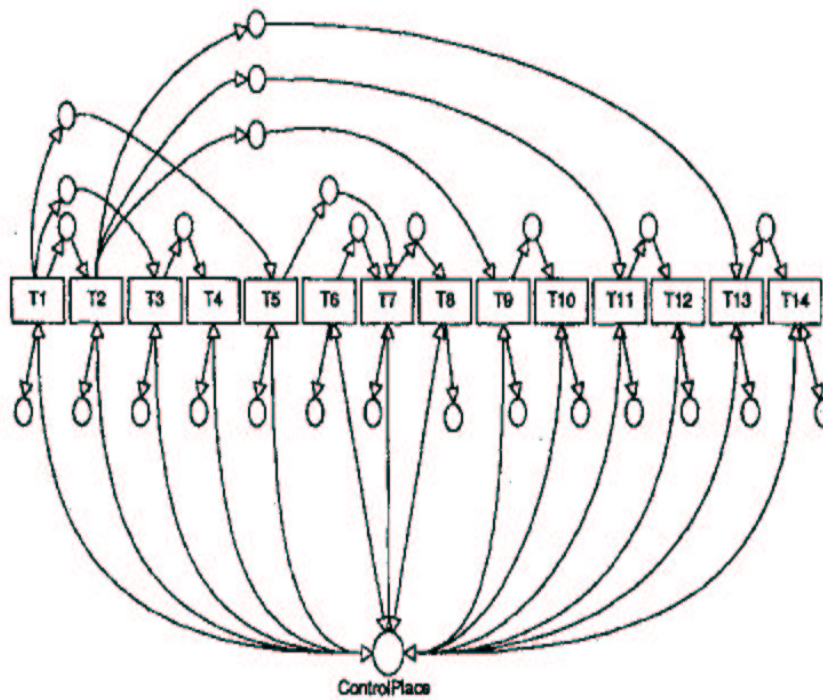
A figura 8.4 apresenta a tabela de usinagem, as operações de usinagem e o grafo de precedência para um exemplo.

|          | Preparation | Rough     | 1/2-Finish | Finish  | Post-finish |
|----------|-------------|-----------|------------|---------|-------------|
| Face 1   |             | MillFAC1  |            |         |             |
| Step 1   |             | MillSTP1  |            |         |             |
| Slot 1   |             | RoughSLT1 |            | FinSLT1 |             |
| Pocket 1 |             | RoughPOC1 |            | FinPOC1 |             |
| Pocket 2 |             | RoughPOC2 |            | FinPOC2 |             |
| Hole 1   |             |           |            |         |             |
| Hole 2   | CenterHOL1  | DrillHOL1 |            |         |             |
| Hole 3   |             |           |            |         |             |
| Hole 4   | CenterHOL2  | DrillHOL2 |            |         |             |
| Hole 5   |             |           |            |         |             |
| Hole 6   | CenterHOL3  | DrillHOL3 |            |         |             |
| Hole 7   |             |           |            |         |             |

Figura 8.4: Tabela de usinagem, operações de usinagem e grafo de precedência

A figura 8.5 apresenta o modelo PNs e o plano de processo final para a peça exemplo . A peça exemplo é apresentada na figura 8.6.





| No. | Operation  | Tool  | Axis position | Table position |
|-----|------------|-------|---------------|----------------|
| 1   | MillFAC1   | TOOL1 | 0             | 0              |
| 2   | MillSTP1   | TOOL2 | 0             | 0              |
| 3   | RoughSLT1  | TOOL3 | 0             | 0              |
| 4   | RoughPOC1  | TOOL3 | 0             | 0              |
| 5   | RoughPOC2  | TOOL3 | 0             | 0              |
| 6   | CenterHOL1 | TOOL6 | 0             | 0              |
| 7   | CenterHOL2 | TOOL6 | 90            | 90             |
| 8   | CenterHOL3 | TOOL6 | 90            | 270            |
| 9   | DrillHOL3  | TOOL8 | 90            | 270            |
| 10  | DrillHOL2  | TOOL8 | 90            | 90             |
| 11  | DrillHOL1  | TOOL7 | 0             | 0              |
| 12  | FinSLT1    | TOOL4 | 0             | 0              |
| 13  | FinPOC1    | TOOL5 | 0             | 0              |
| 14  | FinPOC2    | TOOL5 | 0             | 0              |

Figura 8.5: PNs e plano de processo.

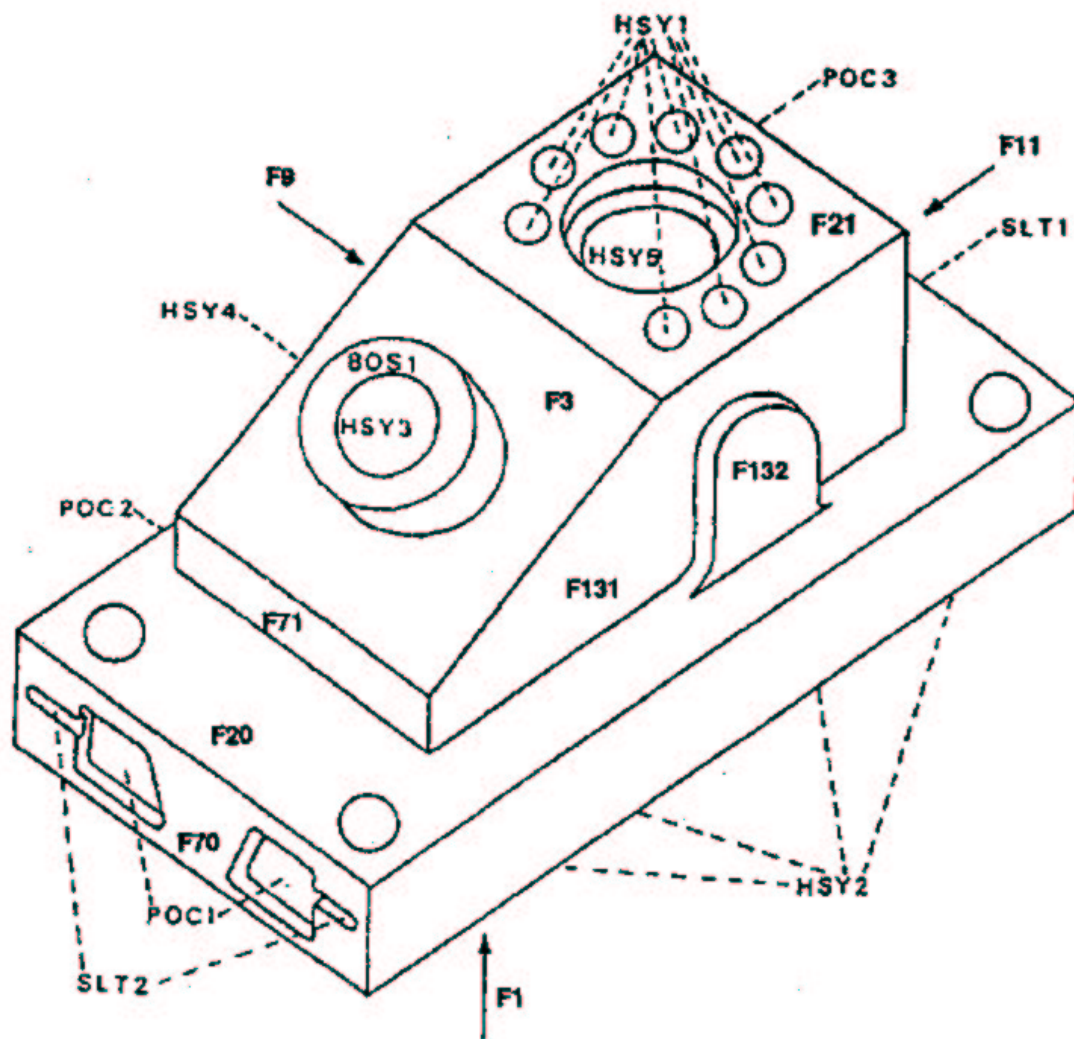


Figura 8.6: Peça exemplo (CAM-Is ANC 101).

## Capítulo 9

# Implantação de Infra-Estrutura no Grima

Com o intuito de viabilizar o desenvolvimento das atividades definidas no plano de doutorado foi necessário implantar uma infra-estrutura computacional mínima no laboratório do Grima através da instalação e configuração de uma estação de trabalho baseado no sistema operacional Linux para arquitetura 386. Desta forma foi feita a instalação de uma distribuição Linux em um computador Pentium III e configurado uma série de serviços (ftp, http, ssh, mysql, tomcat, servlets, xdm, lpd) para trabalharem em uma arquitetura cliente/servidor e que serão utilizados no desenvolvimento da tese.

Foi feita uma especificação de computadores para serem utilizados como estações de trabalho utilizando o sistema operacional Linux e que formarão um *cluster* de máquinas para trabalharem com processamento paralelo, compartilhando o uso de processadores e memória, utilizando a arquitetura MOSIX *cluster* (<ftp://custom.lab.umb.br/pub/cluster/mosix>). Esta atividade ainda não foi implementada pois aguardasse a chegada dos computadores, recentemente adquiridos.

Foi instalado uma série de aplicações voltadas para desenvolvimento de sistemas e que poderão ser utilizadas no desenvolvimento do trabalho de doutoramento na estação trabalho Linux, como:

- Clips: *kernel* para construção de sistemas especialista baseado em regras de produção;
- FuzzyClips: kernel para construção de sistemas especialista baseado em regras de produção e lógica difusa;
- Jess: Clips portado para Java;
- Sistemas CAD 2D: vários sistemas CAD desenvolvidos em C e Java;
- Sistemas CAM: vários sistemas CAM desenvolvidos em C e Java;
- ACIS: kernel para modelagem de sólidos (B-rep e CSG);
- JBuilder Foundation: desenvolvimento de sistema em Java;
- MySQL: sistema de gerenciamento de base de dados relacional utilizando a linguagem SQL;
- Gnu C++: compilador C++ da Gnu;
- Tex, Latex e Lyx: editores de texto de alto nível;
- Staroffice e WordPerfect: editores de texto compatíveis com Windows;
- VNC e Xwin: protocolos e servidores para integração de plataformas Unix e Windows;
- Centenas de aplicações de suporte de desenvolvimento para o mundo Unix.

Estão sendo desenvolvidas atividades de suporte na introdução da cultura Unix no laboratório do Grima ajudando os estagiários na utilização dos sistemas instalados, esclarecendo dúvidas, enfim treinando-os na resolução de problemas relacionados ao uso e administração de sistema Unix e da rede de computadores do Grima baseado no protocolo TCP/IP (*Internet/Intranet*).

Muitas das atividades desenvolvidas nos computadores do Grima são executadas utilizando-se de conexão remota através de aplicações de *login* remoto como o protocolo telnet (*user interface to the TELNET protocol*) e o ssh (*OpenSSH SSH client - remote login program*). Estas aplicações permitem emular um console virtual e “logar” remotamente nas máquinas realizando o trabalho a distância.

Também utilizo o sistema *XDM* (*X Display Manager with support for XDMCP, host chooser*) para conexão remota utilizando janela/display gráfico a fim de executar programas que necessitem de um servidor gráfico X (*X - a portable, network-transparent window system*). Através do xdm utilizo remotamente, em Florianópolis, aplicações CAD/CAM (SmartCam e AutoCad) disponíveis no meu Laboratório em Brasília.

A utilização do ambiente Unix é sem dúvida um grande facilitador para trabalhos cooperativos e a distância pois permitem uma utilização transparente dos recursos de rede TCP/IP em uma arquitetura cliente/servidor nativa em plataforma Unix desde a sua concepção, ou seja, são naturalmente orientados para aplicações em rede. Outra grande vantagem é a utilização de *software open source* e normalmente gratuitos. Todos os *softwares* instalados nos servidores e que serão utilizados nas atividades de doutoramento são *open source* ou gratuitos.

# Capítulo 10

## Conclusões

Este estudo dirigido voltado para os aspectos de planejamento do processo foi de grande validade para o desenvolvimento do tema de doutoramento, pois foi possível estudar e consultar uma grande quantidade de referências sobre planejamento do processo com um profundo detalhamento sobre as atividades a serem realizadas pelo processista em uma abordagem manual até a utilização de sistema de planejamento do processo auxiliados por computador, principalmente os CAPP ditos generativos e baseados em *features*.

As várias atividades a serem realizadas no planejamento do processo e os métodos, algoritmos e lógicas de decisão utilizados na resolução destes problemas foram pesquisados e relacionados. Muitos destas abordagens são minuciosamente descritas nas referências bibliográficas básicas sugeridas no plano de trabalho. Por outro lado, buscou-se através de uma intensa pesquisa bibliográfica, outras fontes de informação que foram armazenadas e disponibilizadas através do endereço: <ftp://omega.enm.unb.br/pub/doutorado>.

Este estudo servirá de base para a definição da metodologia e arquitetura a ser desenvolvida para tese de doutorado. Com o conhecimento adquirido em relação as diversas abordagens de metodologias e implementações realizadas no mundo para integração de sistemas CAD/CAPP/CAM orientados para fabricação de peças rotacionais utilizando o processo de torneamento; ficou claro que a tendência atual é utilizar arquiteturas baseadas em sistemas multi-agentes (MAS), utilização de técnicas de representação do conhecimento como sistemas especialistas, sistemas distribuídos, redes de computadores baseados no protocolo TCP/IP, base de dados relacional para compartilhamento de informações (máquinas, ferramentas, dispositivos de fixação, bibliotecas de features, etc), modelagem baseada em *features*, modelagem de sólidos através de ACIS, entre outros.

A próxima disciplina permitirá o estudo da integração de CAD/CAPP/CAM voltados para internet tendo como referência o sistema CyberCut da Universidade de Berkeley (<http://cybercut.berkeley.edu>) e outros sistemas desenvolvidos no mundo. A disciplina atual permitiu que se adquirisse um profundo conhecimento dos aspectos voltados ao CAPP. Com a análise efetuada nos sistemas de CAPP apresentados na literatura foi possível conhecer como se processa a tomada de decisão para resolver os complexos problemas relacionados ao planejamento do processo, que como já foi dito, cada decisão tomada impoem uma série de restrições para as decisões a serem tomadas posteriormente.



# Referências Bibliográficas

- [1] Abdou, G.; Cheng, R. TVCAPP, Tolerance Verification in Computer-Aided Process Planning. International Journal of Production Research, v.31, n.2, p.393-411, 1993.
- [2] Altling, Leo; Zhang, Hong-Chao. Computer Aided Process Planning: the State-of-the-Art Survey. International Journal of Production Research, v.27, n.4, p.553-585, 1989.
- [3] Altling, Leo. Life-Cycle Design of Products: A New Opportunity for Manufacturing Enterprises. In: KUSIAK, Andrew. Concurrent Engineering: Automation, Tools and Techniques. New York : John Wiley & Sons, Inc, 1993. p.1-17.
- [4] Álvares, A. J., Tourino, S. R., Tele-Fuzzy Control of a Mobile Robo, 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CAD/CAM, ROBOTICS & FACTORIES OF THE FUTURE, 2001 (CARS&FOF 2001), Durban, Kwazulu-Natal, Africa do Sul, 07/2001.
- [5] Anais do International IFIP Conference on Feature Modeling and Advanced Design-For-The-Life-Cycle Systems, Valenciennes, França, 12-14 de Junho, 2001.
- [6] ANSI Y 14.5, Dimensioning and tolerancing, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1982.
- [7] Arakaki, Reginaldo; Arakaki, Julio; Angerami, Paulo Mattos *et al.* Fundamentos de Programação C: Técnicas e Aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro : Livros Técnicos e Científicos, 1990.
- [8] AUTODESK INC. AutoCAD Development System: Programmers Reference Manual. 1. ed. USA : AutoDesk, 1992.
- [9] Bhatnagar A.S., Implementation of feature mapping and reasoning shell with application to group technology coding, MSc Thesis, Arizona State University, August 1988.
- [10] Boerma J.R., The design of fixtures for prismatic parts, PhD thesis, University of Twente, Enschede, 1990.
- [11] Boogert R., Tool management in computer aided process planning, PhD thesis, University of Twente, 1994.
- [12] Boothroyd G., Making it simple, design for assembly, Mechanical Engineering, Feb. 1988, 28-30.
- [13] Bronsvort, Willem F.; Jansen, Frederik W. Multi-View Feature Modelling for Design and Assembly. In: SHAH, Jami J.; MÄNTYLÄ, Martti; NAU, Dana S. Advances in Feature Based Manufacturing. Amsterdam : ELSEVIER, 1994. p.107-128.
- [14] Butzke, A.U.; Ferreira, J.C.E. A Manufacturing Support System for Industrial Part Process Planning.
- [15] ICamarinha, L.M.; Afsarmanesh, H. Balanced Automation Systems: Architectures and Design Methods (BASYS-95). Vitória : CHAPMAN & HALL, 1995. p.159-170.

- [16] CAM-I's illustrated glossary of workpiece form features, R-80-PPP-02.1, 1981.
- [17] CAM-I report R-86-PPP-01, 1986.
- [18] Proceedings features symposium, CAM-I, report no. P-90-PM-02 , Boston, 1990.
- [19] Chang T.C., Anderson D.C., Mitchell O.R., QTC - An integrated design/manufacturing/inspection system for prismatic parts, Computers in Engineering Conference, CIE '88, 1988, 417 - 426.
- [20] Chang T.C., Expert process planning for manufacturing, Addison Wesley, Reading, 1990.
- [21] Chang, T.C., Wysk R.A. e Wang, H.P. Computer Aided Manufacturing, Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering, W.J. Fabrycky e J.H. Mize (eds.), 2ns Edition, 1998.
- [22] Cho, H.; Derebail, A.; Hale, T. *et al.* A Formal Approach to Integrating Computer-Aided Process Planning and Shop Floor Control. ASME Journal of Engineering for Industry, v.116, p.108-116, 1994.
- [23] Coad, Peter; Yourdon, Edward. Análise Baseada em Objetos. 2. ed. Rio de Janeiro : Campus, 1992.
- [24] Cutkosky M.R., Tenenbaum J.M., Muller D., Features in process based design, ASME Computers in Engineering (CIE) Conference, San Francisco, 1988, 557-562.
- [25] Cutkosky M.R., Tenenbaum J.M., Brown D.R., Working with multiple representations in a concurrent design system, Journal of Mechanical Design, Vol. 114, 1992, 515 - 524.
- [26] Cutkosky M.R., Engelmores R.S., Fikes R.E., Genesereth M.R., Gruber T.R., Mark W.S., Tenenbaum J.M., Weber J.C., PACT: An experiment in integrating concurrent engineering systems, IEEE Computer, vol. 26, no.1, 1993, 28-37, <http://www-ksl.stanford.edu/knowledge-sharing>.
- [27] Dépincé, P., Amara H., Hascoët, J. Y., Human Integration in s distributed CAPP framework, Bibliography Anais do International IFIP Conference on Feature Modeling and Advanced Design-For-The-Life-Cycle Systems, Valenciennes, França, 12-14 de Junho, 2001.
- [28] Deere & Company, Part Features for Process Planning, Moline Illinois, 1986.
- [29] Detand J., A computer aided process planning system generating non-linear process plans, Catholic University of Leuven, Belgium, PhD thesis, 1993.
- [30] Dixon J.R., Cunningham J.J., Simmons M.K., Research in designing with features, in Intelligent CAD, I, eds. Yoshikawa H., Gossard D., Proc. IFIP TC 5/ WG 5.2 workshop on intelligent CAD, Elsevier, 1987, 137-148.
- [31] Erve A.H. van 't, Computer Aided Process Planning for Part Manufacturing, an expert system approach, PhD thesis, University of Twente, 1988.
- [32] Ferreira, J.C.E.; Butzke, A.U.; Furlan N., F. A CAD by Features System Applied to an Industrial Reality. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, v.17, n.2, p.209-218, 1995.
- [33] Ferreira, J.C.E., Planejamento do Processo Assistido por Computador - CAPP, Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1996.
- [34] Ferreira J. C. E., Wysk, R. A., An Investigation of the Influence of Alternative Process Plans on Equipment Control, Journal of Manufacturing Systems, Vol.19/N.6, 2001, 393-406.



- [35] Finger S., Dixon J.R., A review of research in engineering design, Part I: Descriptive, prescriptive and computer based models of design processes, *Research in Engineering Design*, Vol.1, 1989, 51-67.
- [36] Finger S., Dixon J.R., A review of research in engineering design, Part II: , Representations, analysis and design for the Lifecycle, *Research in Engineering Design*, Vol.1, 1989, 121-37.
- [37] Finger S., Saifer S.A., Representing and recognizing features in mechanical designs, second international conference on Design Theory and Methodology DTM '90, Chicago, September 1990.
- [38] Gadh R., Flexible mappings as utilized within a flexible features-based design approach, *proc. IFIP W.G. 5.3 Conf. on Feature modeling and recognition in advanced CAD/CAM systems*, Valenciennes (F), Vol.1, 1994, 205-223.
- [39] Groover, M. *Automation, Production System, and Computer Integrated Manufacturing*, 1987, Prentice Hall.
- [40] Halevi, G. e Weill, R.D., "Principles of Process Planning: A Logical Approach", Chapman & Hall, 1995.
- [41] Halevi, G., "Restructuring the Manufacturing Process: Applying the Matrix Method", St. Lucie Press, 1999.
- [42] Hashmi, K., Baradie, M. A., Ryan, M., Fuzzy Logic Based Intelligent Selection of Machining Parameters, *Computers in Industry*, 35, 1998, 571-574.
- [43] Henderson M.R., Anderson D.C., Computer recognition and extraction of form features: a cad/cam link, *Computers in Industry*, 5, 1984, 329- 339.
- [44] Henderson M.R., Chang G.J., FRAPP: Automated feature recognition and process planning from solid model data, *proc. CIE Conference*, 1988.
- [45] Hitachi Seiki, <http://www.hitachiseikiusa.com/controls/index.html>.
- [46] Houten F.J.A.M., Kals H.J.J., Round, a flexible technology based process and operations planning system for NC lathes, *Proceedings of the 16th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Tokyo, 1984.
- [47] Houten F.J.A.M. van, PART: a computer aided process planning system, PhD thesis, University of Twente, Enschede, 1991.
- [48] Houten F.J.A.M., *Manufacturing Interfaces*, *Annals of the CIRP*, Vol. 41, 1992.
- [49] Huang, Hefeng. *A Generative Process Planning System for Turned Components*. Manchester, 1988. Tese (Doutorado em Fabricação Mecânica-Planejamento de Processos). Manufacturing and Machine Tool Division, Mechanical Engineering Department, UMIST.
- [50] Irani R.K., Kim B.H., Dixon J.R., Integrating CAE, features and iterative design of injection molds, *ASME Computers in Engineering Conference CIE '89*, vol.1, Anaheim CA, eds. Riley D.R., Cokonis T.J., 1989, 27-33.
- [51] ISO 1101, *Technical drawings - Geometrical tolerancing - Tolerances of form, orientation, location and run-out - Generalities, definitions, symbols, indications on drawings*, 1983.
- [52] ISO TC184/WG3 N324 -T7, *ISO 10303 - Part 224 Mechanical Product Definition for Process Planning Using Form Features*, South Carolina, EUA, 1994.
- [53] Jonker H.G., *Interactive feature definition*, MSc thesis, University of Twente, report no. SPA-93-23/PT465, Enschede, September, 1993.

- [54] Jonkers F., A software architecture for CAPP systems, PhD thesis, University of Twente, 1992.
- [55] Kals H.J.J., Houten F.J.A.M. van, Erve A.H. van't, Integrated Process Planning, Proceedings of the Seminar on the automated factory approaching the year 2000 (La Fabbrica Automatica colle Soglie del 2000, Risultati E prospettive della Ricerce), Pisa, 23-24 Octobre, 1989.
- [56] Kiritsis, D., Porchet, M., A Generic Petri net model for dynamic process planning and sequence optimization, *Advances in Engineering Software*, Vol. 25, 1996, 61-71.
- [57] Kramer, G.A., Barrow H.H., Agre P.E., Closed-form kinematics, US patent, no. 5,043,929, 1991.
- [58] Kramer, G.A., Solving geometric constraint systems, a case study in kinematics, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [59] Kramer, G.A., A geometric constraint engine, AIJ, 1992, to be obtained via: <ftp://ftp.daimi.aau.dk/pub/CLP>.
- [60] Kramer, G.A., Qualitative kinematics, US patent, no. 5,253,189, 1993.
- [61] Lenderink A., Kals H.J.J., The integration of process planning and machine loading in small batch part manufacturing, *Robotics & Comp. Int. Manuf.*, Vol. 10, no. 1/2, 1993, 89-98.
- [62] Lenderink A., The integration of process and production planning in small batch part manufacturing, PhD thesis, University of Twente, 1994.
- [63] Maraghy H.A., Gu P.H., Expert system for inspection planning, *Annals of the CIRP*, vol.36, 1, 1987, 85-89.
- [64] Maraghy H.A., Evolution and future perspectives of CAPP, *Annals of the CIRP*, vol. 42, no.2, 1993, 1 - 13.
- [65] Maraghy H.A., Maraghy W. H., A system for modeling geometric tolerances for mechanical design, Proc. 3rd CIRP seminar on Comp. Aided Tolerancing, Cachan (F), April 1993, 11-24.
- [66] Mentyle M., Opas J., Puhakka J., Generative process planning of prismatic parts by feature relaxation, in: *Advances of design Automation 1989*, presented at the ASME DDesign Technical Conferences - 15th Design Automation Conference, Montreal Quebec, Canada, 1989, 49-60.
- [67] Mentyle M., Directions for research in product modeling, in *Computer applications in production engineering*, eds. Kimura F., Rolstadas A., Elsevier Science Publishers (North Holland), IFIP, 1989, 71 - 85.
- [68] Masuda H., Shimada K., Numao M., Kawabe S., A mathematical theory and applications of non-manifold geometric modeling, in: *Advanced geometric modelling for engineering applications*, eds. Krause F.L., Jansen H., Elsevier Science Publishers, IFIP, 1990, 89 - 103.
- [69] Nielsen E.H., Dixon J.R., Zinsmeister G.E., Capturing and using designer intent in a design with features system, *Proceedings Design Theory and Methodology*, D-E Vol.31, ASME 1991, 95-102.
- [70] Open Software Foundation, OSF/Motif Style Guide, release 1.2, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1993.
- [71] Parametric Technology Corporation, Pro/Engineer Modelling User's guide, version 12.0, Waltham MA, 1993.

- [72] PDES, PDES Form Feature Information Model, Version 3 (Working), ed. Dunn M., United Technologies Research Center, December 17, 1987.
- [73] Pratt M.J., Solid modeling and the interface between design and manufacture, IEEE Computer Graphics & Applications, July 1984, 52-59.
- [74] Pratt M.J., Wilson P., R., Requirements for support of form features in a solid modelling system, final report, CAM-I report R-85-ASPP-01, June 1985.
- [75] Pratt M.J., Synthesis of an optimal approach to form feature modelling, ASME Computers in Engineering Conference CIE, San Francisco, 1988, 263 -274.
- [76] Pratt M.J., A hybrid feature based modelling system, Advanced geometric modelling for engineering applications, eds. Krause F.L., Jansen H., Elsevier Science Publishers, 1990, 189-210.
- [77] Rezende, D. F., Planejamento de Processo de Fabricação Assistido por Computador Através de um Sistema Especialista Baseado na Tecnologia de Features: Um Modelo de Desenvolvimento Voltado Para a Realidade Industrial, Dissertação de Mestrado, UFSC, 1996.
- [78] Sakurai H., Gossard D.C., Shape feature recognition from 3-D solid models, Computers in Engineering Conference, ASME, San Francisco, 1988, 515 - 519.
- [79] Salomons, O.W. Computer Support in the Design of Mechanical Products. Twente, 1995. Tese (Doutorado em Projeto Mecânico-Ferramentas Computacionais de Suporte). University of Twente.
- [80] Salomons O.W., Evaluation of the ICAD system for feature based design applications, internal report no. PT437, University of Twente, 1992.
- [81] Salomons O.W., Two protocol studies to investigate redesign and process planning, University of Twente, internal report no. PT 417, 1992.
- [82] Salomons O.W., Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., Review of research in feature-based design, Journal of Manufacturing Systems, Vol.12, no.2, 1993, 113-132.
- [83] Salomons O.W., Slooten F. van, Houten F.J.A.M. van, Observations from redesign and process planning practice, a study of human practice aimed at improving feature based CAD/CAPP, proceedings of the Twelfth International Conference on CAD/CAM, Computer Graphics and Computer Aided Technologies (MICAD'93), Vol. 1, Editions Hermes, Paris, 9-12 February, 1993, pp 115-129. (Also: internal report PT 452).
- [84] Salomons O.W., Kappert J.H., Slooten F. van, Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., Computer support in the (re)design of mechanical products, a new approach in feature based design, focusing on the link with CAPP, IFIP Transactions B-11, Knowledge Based Hybrid Systems, Mezger I., Bertek P. (eds.), Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), 1993, pp 91-103.
- [85] Salomons O.W., Slooten F. van, Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., A computer support tool for re-design, a prototype system resulting from applying a methodic design approach, proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED'93, The Hague, August 17 - 19, 1993, Vol. 3, 1559 - 1570.
- [86] Salomons O. W., Bottom-up assembly modelleer functionaliteit, internal report, no. PT 461, University of Twente, 1993.
- [87] Salomons O.W., Slooten F. van, Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., FROOM - a demonstration session, IFIP Transactions B-11, Knowledge Based Hybrid Systems, Mezger I., Bertek P. (eds.), Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), 1993, pp 279-287.

- [88] Salomons O.W., Slooten F. van, Koning G.W.F. de, Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., Conceptual graphs in CAD, CIRP annals, v. 43/1, August 1994, 125-128.
- [89] Salomons O.W., Jonker H.G., Slooten F. van, Houten F.J.A.M. van, Kals H.J.J., Interactive feature definition, proceedings IFIP WG 5.3 Conference on Feature modeling and recognition in advanced CAD/CAM systems, Valenciennes (F), May 24-26, 1994, vol. 1, 181-204, <http://utwpue.wb.utwente.nl/stw-doc/papers/paper-ifd.ps>.
- [90] SANDVIK COROMANT. Herramientas de Tornear: Productos para el Mecanizado del Metal. Dinamarca, 1993 e 1994. Catálogo de Productos.
- [91] Schmekel H., A system for conceptual design of parts, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1989.
- [92] Schmekel H., Modeling of conceptual design using axiomatics, report Royal Institute of Technology, Stockholm, 1990.
- [93] Schmekel H., A system for conceptual design based on general and systematic principles of design, PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1992.
- [94] Schmekel H. Application of axiomatics in product modelling, Human aspects in Computer Integrated Manufacturing, eds. Olling G.J., Kimura F., IFIP, 1992, 211 - 226.
- [95] Silicon Graphics Inc., InPerson™ Product Guide, Silicon Graphics Inc., Mountain View (Ca) USA, 1994.
- [96] Shah J.J., Wilson P.R., Analysis of abstraction, representation and interaction requirements for computer aided engineering, Computers in Engineering Conference, CIE, San Francisco, 1988, 17-24.
- [97] Shah J.J., Synthesis of initial form for structural shape optimization, transactions of the ASME, vol.110, 1988, 564-570.
- [98] Shah J.J., Rogers M.T., Expert form feature modelling shell, Computer Aided Design, Vol.20, No.9, 1988, 515-524.
- [99] Shah J.J., Feature transformations between application-specific feature spaces, Computer Aided Engineering Journal, December 1988, 247-255.
- [100] Shah J.J., Bhatnagar A., Hsiao D., Feature mapping and application shell, Computers in Engineering Conference (CIE), San Francisco, 1988, 489-496.
- [101] Shah J.J., Rogers M.T., Functional requirements and conceptual design of the feature-based modelling system, Computer Aided Engineering Journal, Febr. 1988, 9-15.
- [102] Shah J.J., Rogers M.T., Feature Based Modeling Shell: Design and Implementation, Computers in Engineering Conference (CIE), San Francisco, 1988, 255-261.
- [103] Shah J.J., Bhatnagar A.S., Group technology classification from feature-based geometric models, Manufacturing Review, Vol.2, No.3, September 1989, 204-213.
- [104] Shah J.J., Miller D., A structure for integrating geometric tolerances with form features and geometric models, Computers in Engineering (CIE), 1989, 395-402.
- [105] Shah J.J., Requirements for support of assembly modeling in a feature based environment, a proposal submitted to CAM-I, August 1989.
- [106] Shah J.J., Hsiao D., Robinson R., A framework for manufacturability evaluation in a feature based CAD system, NSF Design and Manufacturability Research Conference, Tempe, AZ, Jan. 1990, 61 -66.

- [107] Shah J.J., An assessment of features technology, CAM-I report P-90-PM-02 , 1990.
- [108] Shah J.J., Philosophical development of form feature concept, CAM-I report P-90-PM-02 , 1990, 55-70.
- [109] Shah J.J., Rogers M.T., Sreevalsan P.C., Hsiao D., Mathew A., Bhatnagar A., Liou B., Miller D.W., The ASU Features Testbed: an overview, ASME Computers in Engineering Conference (CIE), 1990, 233-241.
- [110] Shah J.J., Hsiao D., Robinson R., A framework for manufacturability evaluation in a feature based CAD system, NSF Design & Manufacturability Research Conference, Tempe, AZ, Jan 1990, 61-66.
- [111] Shah J.J., Miller D.W., A structure for supporting geometric tolerances in product definition systems for CIM, Manufacturing Review, Vol.3, No. 1, March 1990, 23-31.
- [112] Shah J.J., Sreevalsan P., Mathew A., Survey of CAD/feature based process planning and NC programming techniques, Computer Aided Engineering Journal, Feb. 1991, 25-33.
- [113] Shah J.J., Conceptual development of form features and feature modelers, Research in Engineering Design., Vol.2, 1991, 93-108.
- [114] Shah J.J., Assessment of features technology, Computer-Aided Design, vol.23, no.5, 1991, 331-343.
- [115] Shah J.J., Mathew A., Experimental investigation of the STEP Form-Feature Information Model, Computer-Aided Design, vol.23, no.4, 1991, 282-296.
- [116] Shah, Jami J., Urban, Susan D, Raghupathy, Siva P. and Rogers, Mary T., Synergetic Design Systems, Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers Computers in Engineering Conference, 1992, vol.1, pp.283-290.
- [117] Shah J.J., Hsiao D., Leonard J., A systematic approach for design-manufacturing feature mapping, IFIP WG 5.2 workshop on geometric modeling, Rensselaerville, September 1992, 205-221.
- [118] Shah, Jami J. and Urban, Susan D. Interoperability Research Issues for Heterogeneous Engineering Design Data, Proceedings of the National Science Foundation Design and Manufacturing Systems Grantees Workshop, 1993, pp. 1843-1846
- [119] Shah, Jami J., Rogers, Marty T. and Urban, Susan D., Engineering data management: achieving integration through database technology, Computing and Control Engineering Journal, june 1993, pp. 119-126
- [120] Shah J.J., Urban S.D., Functional requirements for capturing design histories, proceedings National Science Foundation Design and Manufacturing Systems grantees workshop, 1993, 1831-1836.
- [121] Shah J.J., Rogers M.T., Assembly modeling as an extension of feature based design, Research in Engineering Design, Vol. 5, 1993, 218-237.
- [122] Shah, J.J. e Mäntyla, M., "Advances in Feature Based Manufacturing", Elsevier, 1994.
- [123] Shah J.J., Balakrishnan G., Rogers M.T., Urban S.D., Comparative study of procedural and declarative feature based geometric modeling, proceedings IFIP WG 5.3 Conf. on Feature modeling and recognition in advanced CAD/CAM systems, Vol. 2, Valenciennes, France, April 24-26, 1994, 647-671.

- [124] Shah J.J., Shen Y., Shirur A., Determination of machining volumes from extensible sets of design features, in: *Advances in feature based manufacturing*, eds. Shah J.J., Mentyle M., Nau D., Elsevier, 1994, 129-157.
- [125] Shah J.J., A heterogeneous, active database architecture for engineering data management, *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, Vol.7, No.5, 1994, 276-293.
- [126] Silva, A. D., *Uma Metodologia para Otimização Automática de Parâmetros de Usinagem*. Florianópolis, 1994. Tese (Doutorado em Fabricação Mecânica-Planejamento de Processos). Universidade Federal de Santa Catarina.
- [127] Smith C. S., Wright, P. K., *Cybercut: A World Wide Web Based Design to Fabrication Tool*, 2000, <http://cybercut.berkeley.edu>.
- [128] Spatial Technology, *ACIS Geometric modeler*, Boulder, Colorado, 1994.
- [129] Srinivasan V., Jayaraman R., Geometric tolerancing: II. Conditional tolerances, *IBM J. Res. & Developm.*, Vol. 33, No. 2, 1989, 105-123.
- [130] Stemmer, G. E. *Ferramentas de Corte I. 3. ed.* Florianópolis : Editora da UFSC, 1993.
- [131] STEP, ISO TC184/SC4/WG5, *Express language reference manual (ISO 10303, part 11)*, release draft, Spiby P. (ed.) , 1991.
- [132] STEP, ISO TC184/SC4/WG5, *Express-I language reference manual (ISO/WD 10303-12)*, working project draft, Wilson P. (ed.), 1992.
- [133] STEP, ISO TC184/SC4/WG5, *Industrial automation systems- product data representation and exchange, (ISO/WD 10303-part 48: Form features)*, 1992.
- [134] Stoltenkamp H., Oudolf W., Kals H.J.J., Cubic, a highly automated system for programming NC machining centers, *Proceedings of PROLAMAT*, Ann Arbor, 1979.
- [135] Sundaram, R. M., *Process Planning and Machining Sequence*, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 11, 1986, 27-31.
- [136] Sutherland I.E., *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*, PhD thesis, MIT, Cambridge, USA, 1963.
- [137] Thornton A.C., *Constraint specification and satisfaction in embodiment design*, PhD thesis, University of Cambridge, 1993.
- [138] Thornton A.C., Johnson A., *Constraint specification and satisfaction in embodiment design*, *Proc. Int. Conf. on Engineering Design, ICED 93*, The Hague, August 17-19, 1993, 1319-1326.
- [139] Tönshoff, H.K.; Aurich, J.C.; Baum, Th. *Configurable Feature-Based CAD/CAPP System*. *Proceedings of the IFIP International Conference on Feature Modeling and Recognition in Advanced CAD/CAM Systems*. Valenciennes, France, p.757-769, 1994.
- [140] Turner J.U., Wozny M.J., *A mathematical theory of tolerances*, in: *Geometric Modelling for CAD Applications*, eds. Wozny M.J., McLaughlin J.L., Elsevier Science Publishers, IFIP, 1988, 163-187.
- [141] Turner J.U., *Relative positioning of parts in assemblies using mathematical programming*, *Computer Aided Design*, Vol. 22, no. 7, 1990, 394-400.
- [142] Turner J.U., Gangoiti A.B., *Commercial software for tolerance analysis*, *Computers in Engineering*, Vol.1, ASME, 1991, 495-503.

- [143] Turner J.U., A feasibility space approach for automated tolerancing, *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, 1993, 341-345.
- [144] Ullman D.G., Dietterich T.G., Stauffer L., A model of the mechanical design process based on empirical data, *Artificial Intelligence for Engineering, Design, analysis and manufacturing*, vol.2, 1988, 33 - 52.
- [145] Ullman D.G., Wood S., Craig D., The importance of drawing in the mechanical design process, *Comput. & Graphics*, Vol.14, No.2, 1990.
- [146] Ullman D.G., Design histories: archiving the evolution of products, proceedings of the DARPA Workshop on Manufacturing, February 5-6, Salt Lake City, Utah, 1991.
- [147] Ullman D.G., *The mechanical design process*, McGraw Hill, 1992.
- [148] Ullman D.G., A new view on function modeling, *International Conference on Engineering Design, ICED'93*, The Hague, August 17-19, Vol.1, 1993, 21-29.
- [149] Vandenbrande, Jan H.; Requicha, Aristides A.G. Geometric Computation for the Recognition of Spatially Interacting Machining Features. In: SHAH, Jami J.; MÄNTYLÄ, Martti; NAU, Dana S. *Advances in Feature Based Manufacturing*. Amsterdam : ELSEVIER, 1994. p.83-106.
- [150] Van't A.H., *Generative Computer Aided Process Planning for Part Manufacturing - An Expert System Approach*, PhD thesis, University of Twente, Enschede, 1985.
- [151] Vin L.J. de, Vries J. de, Streppel A.H., Kals H.J.J., PART-S, a CAPP system for small batch manufacturing of Sheet metal components, *Manufacturing Systems*, (proceedings of the CIRP Seminars), Vol. 22, No. 2, 1993, 133 - 141.
- [152] Vin L.J. de, Streppel A.H., Ittersum E. van, Kals H.J.J., Tolerancing and the accuracy of bending operations in sheet metal part manufacturing, *proc. of the IMC-10 conference*, Galway, September 8-10, 1993, 423-436.
- [153] Vin L.J. de, *Computer Aided Planning of Bending Operations for Sheet Metal Components*, PhD thesis, University of Twente, 1994.
- [154] Vin L.J. de, Streppel A.H., Kals H.J.J., Tolerancing and sheet bending in small batch part manufacturing, *Annals of the CIRP*, Vol.43/1, 1994, 421-424.
- [155] Vries T.J.A. de, *Conceptual design of controlled electro-mechanical systems, a modeling perspective*, PhD thesis, University of Twente 1994.
- [156] Vries J. de, Roosmalen A.A.H.M., Streppel A.H., Kals H.J.J., Planning and nesting in small batch sheet metal manufacturing, *Manufacturing Systems*, (proceedings of the CIRP Seminars), vol. 23, 1994.
- [157] Vries J. de, Salomons O.W., Streppel A.H., Vin L.J. de, Kals H.J.J., CAD-CAPP integration for sheet metal products, *proceedings 2nd. Int. Conf. on Sheet Metal*, Belfast, 1994, 75-86.
- [158] Vries J. de, A process planning system for sheet metal part processing, an integrated approach, PhD thesis in progress, University of Twente, 1995.
- [159] Wagner M.R., *Understanding the ICAD system*, ICAD Inc., Cambridge MA, 1990.
- [160] Wang N., Ozsoy T.M., Representation of assemblies for automatic tolerance chain generation, *Engineering with Computers*, 6, 1990, 121-126.
- [161] Wang M-T., An object-oriented feature-based CAD-CAPP-CAM integration framework, *Advances in Design Automation*, vol.1, ASME 1991, DE Vol.32-1, 109-116.

- [162] Wang N., Ozsoy T.M., A scheme to represent features, dimensions and tolerances in geometric modeling, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.10, No.3, 1991, 233-240.
- [163] Wang, H.P. e Li, J.K., *Computer-Aided Process Planning*, Advances in Industrial Engineering, Vol. 13, Elsevier, 1991.
- [164] Waterman, Donald A. *A Guide to Expert Systems*. 1. ed. Massachusetts : Addison-Wesley, 1986.
- [165] Weill R., Tolerancing for Function, *Annals of the CIRP*, vol.37, no.2, 1988, 603-610.
- [166] Wilson P.R., Solid modeling research and applications in the U.S.A., in *Geometric modeling for CAD applications*, eds. Wozny M.J., McLaughlin J.L., Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), IFIP, 1988, 69-88.
- [167] Wilson P.R., Pratt M.J., A taxonomy of form features for solid modeling, in *Geometric Modeling for CAD applications*, eds. Wozny M.J., McLaughlin H.W., Elsevier Science Publishers B.V. (North Holland), IFIP., 1988, 125-135.
- [168] Wilson W.R.D., Wang J., A multi-expert system for sheet metal part design, *DE-Vol. 32-1*, *Advances in Design Automation*, Vol. 1, 1991, pp. 55-61.
- [169] WU, B. Object-Oriented systems analysis and definition of manufacturing operations. *International Journal of Production Research*, v.33, n.4, p.955-974, 1995.
- [170] Zhang C., Wang H-P., Integrated tolerance optimisation with simulated annealing, *J. Adv. Manuf. Techn.*, vol.8, 1993, 167-174.