

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 28.11.00
Ass: 

**INTEGRAÇÃO CAD E CAPP AUTOMÁTICO
PARA PEÇAS PARAMÉTRICAS VISANDO
APOIAR ATIVIDADES DE DETALHAMENTO DO
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO**

Alexandre Balderi Xella



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Tit. Henrique Rozenfeld

São Carlos
2000

Class.	TESE - EENC
Cutt.	6330
Tombo	032/01

31100017107

st 1128639

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

X4i Xella, Alexandre Balderi
Integração CAD e CAPP automático para peças
paramétricas visando apoiar atividades de detalhamento
do desenvolvimento de produto / Alexandre Balderi
Xella -- São Carlos, 2000.
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Henrique Rozenfeld.

1. Integração. 2. CAD. 3. CAPP. 4. Peças
paramétricas. 5. Sistemas de informação.
6. Desenvolvimento de produto. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE BALDERI XELLA**

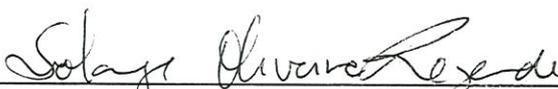
Dissertação defendida e aprovada em 29.09.2000
pela Comissão Julgadora:



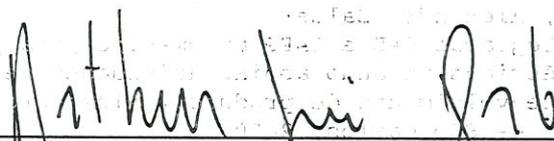
Prof. Titular **HENRIQUE ROZENFELD (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **OSWALDO LUIZ AGOSTINHO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Profª. Doutora **SOLANGE OLIVEIRA REZENDE**
(Instituto de Ciências Matemáticas e Computação - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*"Se fazer fosse tão fácil como saber o que é conveniente fazer, as capelas
seriam igrejas, e as cabanas dos pobres seriam palácios"*

William Shakespeare

*A toda minha família e
especialmente meus pais e irmão pelo apoio constante.*

Agradecimentos

Ao orientador, professor e amigo Henrique Rozenfeld, pelo grande aprendizado passado durante este meu importante período de formação.

Aos amigos do Grupo de Engenharia Integrada: Ana Paula, André, Cristiane, Daniel Capaldo, Daniel Dupas, Eduardo Chup, Fernandinho, Francis, Leo, Lucas, Luís, Marcelo, Renato, Sandro Azul, Sérgio e Vander.

A todos amigos de São Carlos pelo companheirismo nesta “empreitada” de graduação e pós-graduação, e especialmente à Nádia pelos bons momentos proporcionados.

Aos amigos de Santo André, Anderson, Aníbal, Cesar, Cristian, David, Ricardo, Rodrigo e todos outros, por serem companheiros constantes de grandes “aventuras e baladas”.

À CAPES pela bolsa concedida para a realização deste trabalho.

Ao Adílson Carlos Nagao e equipe de suporte da KSR pelo apoio oferecido durante a implementação da solução.

Às secretarias de pós-graduação da mecânica e geral pela receptividade.

A todos que não estão incluídos aqui mas que contribuíram indiretamente na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMÁTICA ENVOLVIDA	1
1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA	4
1.3 QUESTÕES	7
1.4 OBJETIVO	7
1.5 METODOLOGIA	7
1.6 APRESENTAÇÃO DESTE TRABALHO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	13
2.1.1 <i>O desenvolvimento de produto e suas características</i>	13
2.1.2 <i>Conceitos de integração e a sua importância para o desenvolvimento de produto</i>	14
2.1.3 <i>Engenharia Simultânea</i>	16
2.1.4 <i>Dimensões do desenvolvimento de produto na visão por processos</i>	17
2.2 LOCALIZAÇÃO DE PROJETO E PLANEJAMENTO DE PROCESSO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	18
2.3 O PROCESSO DE PROJETO	21
2.3.1 <i>Conceitos básicos</i>	21
2.3.2 <i>Projeto "clássico" versus projeto moderno</i>	22
2.3.3 <i>O papel da função no processo de projeto</i>	24
2.3.4 <i>Projeto - visão sistemática</i>	25
2.4 PROJETO ASSISTIDO POR COMPUTADOR (CAD)	27
2.4.1 <i>CAD como auxílio às tarefas de projeto</i>	27
2.4.2 <i>CAD como auxílio às fases do projeto sistemático</i>	29
2.4.3 <i>Modelagem em CAD na fase do projeto detalhado</i>	31

2.4.3.1 Modelagem não-sólida	32
2.4.3.1.1 Modelagem wireframe (em arame)	32
2.4.3.1.2 Modelagem em superfície	32
2.4.3.2 Modelagem sólida	33
2.4.3.2.1 Geometria Sólida Construtiva (CSG)	33
2.4.3.2.2 Representação por Fronteira (B-rep)	34
2.5 MODELAGEM BASEADA EM <i>FEATURE</i>	35
2.5.1 <i>Introdução</i>	35
2.5.2 <i>Definições de features</i>	36
2.5.3 <i>Formas de se estabelecer features</i>	39
2.5.4 <i>O projeto baseado em feature</i>	40
2.5.4.1 Modelagem paramétrica	40
2.5.5 <i>O projeto baseado em feature no contexto do processo de projeto</i>	42
2.5.5.1 O enfoque à priori	42
2.5.5.2 O enfoque à posteriori	43
2.5.5.3 Projeto Visando X (DFx) baseado em feature	44
2.5.5.4 O ponto de vista do projeto	45
2.5.5.5 O ponto de vista do planejamento de processo	46
2.6 PLANEJAMENTO DE PROCESSO	46
2.6.1 <i>Processos de manufatura e o planejamento de processo</i>	47
2.6.2 <i>Localização em relação ao fluxo de informação</i>	49
2.6.3 <i>Plano de processo e seu nível de detalhamento</i>	50
2.6.4 <i>Funções e métodos de planejamento</i>	50
2.7 PLANEJAMENTO DO PROCESSO ASSISTIDO POR COMPUTADOR (CAPP)	51
2.7.1 <i>Características do planejamento de processo convencional e razões para a sua assistência por computador</i>	51
2.7.2 <i>O Planejamento de Processo Assistido por Computador e seus benefícios</i>	53
2.7.3 <i>Métodos de CAPP</i>	55
2.7.3.1 Método interativo	55
2.7.3.2 Método variante	55
2.7.3.3 Método generativo automático	57
2.7.3.4 Solução híbrida	57
2.8 PLANEJAMENTO DE PROCESSO AUTOMATIZADO POR COMPUTADOR	58
2.8.1 <i>Reconhecimento de features</i>	59
2.8.2 <i>Definição interativa de features</i>	61
2.8.3 <i>Componentes funcionais de um sistema CAPP automático</i>	63
2.8.3.1 Descrição da peça/produto	63
2.8.3.1.1 Linguagens descritivas	64
2.8.3.1.2 Representações em CAD	64
2.8.3.2 Inferência e o conhecimento em planejamento de processo	65
2.8.3.3 Base de dados	66

2.9 FORMAS DE INTEGRAÇÃO CAD-CAPP	66
2.9.1 <i>Formatos neutros para o interfaceamento CAD-CAPP</i>	67
2.10 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	69
3 CONTEXTO DO TRABALHO	73
3.1 CASO 1: O PRODUTO APRESENTA PEÇAS COM FORMAS RADICALMENTE INOVADORAS	76
3.2 CASO 2: O PRODUTO APRESENTA PEÇAS QUE PODEM SER PARAMETRIZADAS	78
4 DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO CAD/CAPP INTEGRADA VISANDO O PLANEJAMENTO DE PROCESSO AUTOMÁTICO DE PEÇAS PARAMÉTRICAS	81
4.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO	81
4.2 IDENTIFICAÇÃO DOS REQUISITOS	82
4.3 ESQUEMATIZAÇÃO DA SOLUÇÃO	83
4.4 SELEÇÃO DOS SOFTWARES	85
4.5 ADAPTAÇÃO DOS REQUISITOS ÀS CARACTERÍSTICAS DOS SOFTWARES	87
4.6 PROJETO DE INTEGRAÇÃO DE DADOS ENTRE OS SOFTWARES	88
4.6.1 <i>Projeto de integração entre o CLASSCOM e o MDT</i>	89
4.6.1.1 <i>Planilha excel integrada</i>	89
4.6.1.2 <i>Integração por Dynamic Data Exchange (DDE)</i>	90
4.6.2 <i>Projeto de integração entre o Editor de Planos Macro e o MDT</i>	91
4.7 PROJETO DE PREPARAÇÃO E CUSTOMIZAÇÃO DOS SOFTWARES	92
4.7.1 <i>Preenchimento da base de dados básica do CAPPE e definição dos relacionamentos</i>	92
4.7.2 <i>Preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças</i>	93
4.7.3 <i>Preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro</i>	93
4.7.4 <i>Preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT</i>	94
4.7.5 <i>Preparação do MDT para a edição automática dos desenhos</i>	95
4.8 ESPECIFICAÇÃO DA SISTEMÁTICA DE OPERAÇÃO	96
4.9 APLICAÇÃO PRÁTICA	98
4.9.1 <i>Escolha do escopo de peças paramétricas exemplo</i>	98
4.9.2 <i>Levantamento dos dados necessários para a preparação da aplicação</i>	100
4.9.2.1 <i>Análise dos desenhos de produto e planos de processo</i>	100
4.9.2.2 <i>Definição dos parâmetros de entrada e features</i>	100
4.9.2.3 <i>Definição dos parâmetros de saída, fórmulas, regras, operações, e outros recursos</i>	101
4.9.3 <i>Preparação da aplicação</i>	104
4.9.3.1 <i>Preenchimento da base de dados básica do CAPPE e definição dos relacionamentos</i>	105
4.9.3.2 <i>Preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças</i>	107
4.9.3.3 <i>Preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro</i>	108
4.9.3.4 <i>Preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT</i>	109
4.9.3.5 <i>Preparação do MDT para a edição automática dos desenhos</i>	110

4.9.3.6 Integração MDT-CAPPE	111
4.10 VERIFICAÇÃO DA APLICAÇÃO	113
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
ANEXOS	117
REFERÊNCIAS	121
GLOSSÁRIO	125

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ETAPAS DO TRABALHO	8
FIGURA 2: ETAPAS DA APLICAÇÃO PRÁTICA.....	11
FIGURA 3: LOCALIZAÇÃO DE PROJETO E DE PLANEJAMENTO DE PROCESSO NO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.....	19
FIGURA 4: AS INTER-RELAÇÕES ENTRE SUB-FUNÇÃO, EFEITO FÍSICO, PRINCÍPIO FÍSICO E PRINCÍPIO DE SOLUÇÃO (PAHL, 1984 APUD HOUTEN, 1991).....	26
FIGURA 5: FATORES E O PROJETO BASEADO EM FEATURE - IMPORTÂNCIA.....	36
FIGURA 6: ALGUMAS DEFINIÇÕES DE FEATURE	37
FIGURA 7: FORMAS DE SE ESTABELEECER FEATURES.....	62
FIGURA 8: PRINCÍPIO DE TROCA DE DADOS STEP.....	69
FIGURA 9: ESQUEMA DE UM SISTEMA CAD INTEGRADO A UM CAPP GENERATIVO AUTOMÁTICO PELA TÉCNICA DE FORMATOS NEUTROS DE INTERFACEAMENTO (AS LEGENDAS ENCONTRAM-SE NAS TABELAS 1, 2, 3, E 4)	73
FIGURA 10: ESQUEMA DO SISTEMA.....	85
FIGURA 11: ESQUEMA DO SISTEMA COM OS SOFTWARES COMERCIAIS	88
FIGURA 12: ESQUEMA PARA INTEGRAÇÃO VIA PLANILHA EXCEL COMUM AOS DOIS SISTEMAS	89
FIGURA 13: PROCESSO SISTEMÁTICO PARA INTEGRAÇÃO VIA DDE.....	90
FIGURA 14: ETAPAS PARA A ESCOLHA DO ESCOPO DE PEÇAS PARAMÉTRICAS EXEMPLO.....	99
FIGURA 15: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E FEATURES	101
FIGURA 16: SISTEMÁTICA DA SOLUÇÃO E OS DADOS NECESSÁRIOS PARA A SUA PREPARAÇÃO.....	102
FIGURA 17: ATIVIDADES DE PREPARAÇÃO DA APLICAÇÃO.....	105
FIGURA 18: PROCEDIMENTOS PARA O PREENCHIMENTO DA BASE DE DADOS BÁSICA DO CAPPE	107
FIGURA 19: PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO CAPPE PARA O CADASTRO/CLASSIFICAÇÃO DE NOVAS PEÇAS	108
FIGURA 20: PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO CAPPE PARA A ELABORAÇÃO AUTOMÁTICA DOS PLANOS MACRO	109
FIGURA 21: PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO CAPPE PARA A EDIÇÃO AUTOMÁTICA DOS DESENHOS NO MDT.....	110
FIGURA 22: PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO DO MDT PARA A EDIÇÃO AUTOMÁTICA DOS DESENHOS	111
FIGURA 23: PROCEDIMENTOS PARA A EFETIVAÇÃO DA INTEGRAÇÃO MDT-CAPPE	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: LEGENDA DA FIGURA 9: DADOS COMUNICADOS QUANDO A PEÇA É RADICALMENTE INOVADORA E O MODELAMENTO EM CAD É BASEADO EM FEATURES DE MANUFATURA	74
TABELA 2: LEGENDA DA FIGURA 9: DADOS COMUNICADOS QUANDO A PEÇA É RADICALMENTE INOVADORA O MODELAMENTO EM CAD É BASEADO EM FEATURES DE PROJETO	74
TABELA 3: LEGENDA DA FIGURA 9: DADOS COMUNICADOS QUANDO A PEÇA É RADICALMENTE INOVADORA E O MODELAMENTO EM CAD NÃO É BASEADO EM FEATURES	75
TABELA 4: LEGENDA DA FIGURA 9: DADOS COMUNICADOS QUANDO A PEÇA É PARAMÉTRICA (O MODELAMENTO NÃO É NECESSÁRIO)	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D / 3D	- Duas / três dimensões
ADDL	- Linguagem para Descrição de Projeto de Artefato
AI / IA	- Inteligência Artificial
ASU	- Universidade do Estado do Arizona
B-rep	- Representação por Fronteira
B-splines	- Curvas de Bezier ou de Boor
CAD	- Projeto Assistido por Computador
CADDrawings	- Desenhos 2D em CAD
CADrafting	- Modeladores geométricos
CAE	- Engenharia Assistida por Computador
CALS	- Aquisição e Suporte à Logística Assistidos por Computador
CAM	- Manufatura Assistida por Computador
CAM-I	- Manufatura Assistida por Computador Internacional
CAPP	- Planejamento de Processo Assistido por Computador
CAPPE	- Ambiente de Planejamento de Processo Assistido por Computador (software CAPP comercial)
CAQ	- Qualidade Assistida por Computador
CIM	- Manufatura Integrada por Computador
CLASSCOM	- Classificador de Componentes
NC / CN	- Controle/Comando Numérico
COM	- Gerenciamento de Objetos Comuns
CORBA	- Arquitetura Comum para Corretor de Pedidos de Objetos
CSG	- Geometria Sólida Construtiva
CWI	- Centro para Ciências Matemáticas e de Computação em Amsterdã
DB	- Base de Dados
DDE	- Troca Dinâmica de Dados
DDEML	- Biblioteca para Gerenciamento de Troca Dinâmica de Dados
DEC	- <i>Digital Equipment Corporation</i>
DFA	- Projeto Visando Montagem
DFM	- Projeto Visando Manufatura
DFMA	- Projeto Visando Manufatura e Montagem
DFX	- Projeto Visando “Tudo” ou Projeto Concorrente

DICAD	- Sistema CAD Inteligente Orientado a Diálogo
ERP	- Planejamento dos Recursos da Empresa
ES / SE	- Sistemas Especialistas
FEM	- Método dos Elementos Finitos
FFIM	- Modelo de Informações de Features de Forma
FIM	- Fábrica Integrada Modelo
FMEA	- Análise de Efeitos e Modos de Falha
GT / TG	- Tecnologia de Grupo
HMS	- <i>Houtzeel Manufacturing Systems</i>
IGES	- Especificação de Troca Inicial de Gráficos
IIICAD	- Sistema CAD Interativo Integrado Inteligente
ISO	- Organização de Padrões Internacionais
KBS	- Sistemas Baseados em Conhecimento ou em inteligência artificial
MDT	- <i>Mechanical Desktop</i> (software CAD comercial)
MRP II	- Planejamento dos Recursos de Manufatura
NUMA	- Núcleo de Manufatura Avançada
NURBS	- Curvas de Bezier ou de Boor Racionais Não-Uniformes
OIR	- Organização de Pesquisa Industrial
OLE	- Vínculo e Embutimento de Objetos
PCP	- Planejamento e Controle da Produção
PDES	- Especificação de Troca de Dados de Produto
QFD	- Desdobramento da Função Qualidade
relational DBMS	- Sistema de Gerenciamento de Base de Dados Relacional
SCC	- Sistema de Classificação e Codificação
SE / ES	- Engenharia Simultânea
SET	- Padrão para Troca e Transferência
STEP	- Padrão para a Troca de Dados de Modelo de Produto e Processo
USP	- Universidade de São Paulo
VDA-FS	- Federação da Indústria Automobilística Alemã – Área de Interfaces
XCON	- Configuração de Sistema Especialista

RESUMO

XELLA, A. B. (2000). *Integração CAD e CAPP automático para peças paramétricas visando apoiar atividades de detalhamento do desenvolvimento de produto*. São Carlos, 2000. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

As atividades de detalhamento do desenvolvimento de produto podem utilizar-se do apoio das ferramentas CAD e CAPP separadamente para obter um maior grau de otimização em pontos específicos. No entanto, a integração entre CAD e CAPP aproveita melhor o potencial de otimização dessas ferramentas no contexto do processo de desenvolvimento. As peças paramétricas são manufaturadas por inúmeras empresas. Além disso, permitem a sistematização e automação de uma considerável parte das atividades de detalhamento. Este trabalho tem o objetivo de desenvolver uma solução CAD/CAPP integrada para uso com peças paramétricas. Para isso, adotou-se uma metodologia que utiliza a pesquisa-ação e um método de desenvolvimento de sistemas de informação influenciado pelo uso de softwares comerciais. As funções principais da solução são: geração automática do desenho de produto da nova peça; geração automática do plano de processo macro da nova peça; e geração automática dos croquis de chão-de-fábrica das operações macro de fabricação. A aplicação prática foi realizada utilizando-se engrenagens cilíndricas simples como o escopo de peças paramétricas. Na verificação foram observados alguns fatores qualitativos, que se apresentaram bastante satisfatórios. A solução permite que a sua aplicação seja subsequentemente ampliada para outros grupos de peças paramétricas.

Palavras-chave: integração; CAD; CAPP; peças paramétricas; sistemas de informação; desenvolvimento de produto.

ABSTRACT

XELLA, A. B. (2000). *Integration of CAD and generative CAPP for parametric parts to support detailing activities of product development*. São Carlos, 2000. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The detailing activities of product development can make use of CAD and CAPP tools support separately to obtain a higher degree of optimization on specific points. However, the integration between CAD and CAPP makes more of optimization potential of these tools in the context of the development process. The parametric parts are manufactured by innumerable enterprises. Also, they allow the systematization and automation of a considerable part of the detailing activities. This work has the objective of developing an integrated CAD/CAPP solution for use with parametric parts. For that, it was adopted a methodology that uses the action-research and an information system development method influenced by the use of commercial software's. The principal functions of the solution are: automatic generation of the product drawing of the new part; automatic generation of the macro process plan of the new part; and automatic generation of the shop-floor sketch of the manufacturing macro operations. The practical application was realized using simple cylindrical gears as the scope of parametric parts. In the verification it were observed some qualitative factors, that were considered very satisfactory. The solution allows its application to be subsequently enlarged to other groups of parametric parts.

Keywords: integration; CAD; CAPP; parametric parts; information systems; product development.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos produtos tornou-se um ponto focal da competição industrial. Evidências mostram que se feito de forma efetiva, tem um significativo impacto em custo, qualidade, satisfação do cliente, e vantagem competitiva. Nesse processo, segundo CLARK & FUJIMOTO (1991), a fonte principal de um desempenho superior é a integração. A manufatura integrada por computador (CIM), por suas funções de integração e automação em uma empresa de manufatura, oferece um ambiente muito favorável ao aumento de desempenho do processo de desenvolvimento de produto.

As atividades de projeto detalhado e planejamento de processo são essenciais na fase de detalhamento do desenvolvimento de produto. As ferramentas CAD e CAPP existem para assistir e otimizar essas atividades. Porém, somente com a integração CAD/CAPP é que se pode aproveitar todo o potencial de aplicação dessas ferramentas.

1.1 Problemática envolvida

Os sistemas de manufatura integrada por computador (CIM) tentam integrar projeto, planejamento de processo, planejamento de requisição de material, e outras funções no ambiente produtivo. Entretanto, desenvolver sistemas de manufatura realmente integrados é provado não ser um empreendimento trivial (JI & MAREFAT, 1997).

Nas duas décadas passadas, os softwares amadureceram e as aplicações foram otimizadas a domínios funcionais específicos, mas com diferentes estruturas de dados e as informações sobrepostas entre domínios interativos são armazenadas em formatos incompatíveis em múltiplas posições da aplicação (DHAMIJA *et al.*, 1997). Os sistemas como CAD, CAPP, CAM, CAQ, dão um apoio significativo ao usuário, mas oferecem soluções isoladas para cada área específica, meio distantes umas das outras e sem comunicação, como se fossem “ilhas” de soluções. Sendo a comunicação limitada ela

depende da interferência direta dos usuários, principalmente em uma integração CAD/CAPP/CAM (SCHULZ & SCHÜTZER, 1993).

A existência de “ilhas de soluções” desintegradas leva a alguns problemas, como recuperação mais lenta de informação, a não padronização dos dados do produto e processo, pouca sistematização e automação do fluxo de informação e trabalho, mão-de-obra em maior número e com pouca visão integrada do processo. Assim, embora foram observados ganhos de produtividade dentro de pontos de excelência, o impacto global dessas aplicações nas organizações foi mínimo (DHAMIJA *et al.*, 1997).

Na última década tem sido mais claramente reconhecido por ambos ambientes acadêmico e industrial que para se obter sucesso na implementação de um ambiente CIM, é vital a realização da integração CAD/CAM (ÖZTÜRK, 1997). O CAPP (planejamento de processo assistido por computador) viabiliza esse processo por ser considerado uma ferramenta de ligação entre o CAD e o CAM (HOUTEN, 1991) porque o CAPP converte dados de projeto em instruções detalhadas de manufatura (WANG & LI, 1991). Em seu estágio mais avançado o CAPP proverá uma interface automatizada entre CAD e CAM e no processo contribuir para alcançar a integração e automação completa dentro do sistema de manufatura (WANG & LI, 1991; SORMAZ & KHOSHNEVIS, 1997).

Por isso, segundo ELMARAGHY (1993)¹ *apud* LUO *et al.* (1997), MING *et al.* (1998), WANG & LI (1991), CAY & CHASSAPIS (1997) e ROZENFELD (1994), os recentes avanços e interesses em manufatura integrada, desenvolvimento de produto acelerado e engenharia simultânea têm considerado o CAPP um dos agentes críticos, efetivos e essenciais para se alcançar a integração entre os vários módulos do CIM e a sua implementação. A ligação e integração CAD/CAPP é assim um importante passo rumo ao CIM.

Um sistema CAD/CAPP integrado é considerado como um recurso relativo à tecnologia de informação, sistema computacional ou aplicativo de assistência à engenharia e à informação concernente. Seu maior objetivo ou função é fornecer resultados de planejamento de processo a partir dos dados do CAD e/ou utilizando o CAD para a ilustração desses resultados, mas sem a assistência e interação humana no processo. Também pode oferecer *feedback* de informação de manufatura ao CAD, auxiliando os projetistas e viabilizando a técnica de DFMA. Esse recurso procura satisfazer a crescente necessidade de otimização e integração de atividades do processo de desenvolvimento de produto no conceito CIM.

¹ ELMARAGHY, H.A. (1993). Evolution and future perspectives of CAPP. *Annals of the CIRP*, 42, p.739-751.

No desenvolvimento de um sistema CAD/CAPP, há basicamente dois maiores problemas a serem enfrentados e superados: a dificuldade em automatizar a interpretação da geometria da peça do ponto de vista do planejamento de processo, e a dificuldade em se alcançar a automação do planejamento de processo propriamente dito, após a sua interpretação.

A interpretação da geometria da peça é necessária e básica para se realizar as atividades de planejamento de processo. O projetista em suas atividades tem em mente entidades de nível mais alto, como formas necessárias para satisfazer determinadas funções da peça, ou até formas orientadas à manufatura, viabilizando a engenharia simultânea, mas quebra essas entidades em entidades de nível mais baixo para representar a peça no CAD (CAD para projeto detalhado), como pontos, segmentos, áreas, etc. Assim, as entidades de nível mais alto que estão na mente do projetista não são armazenadas em formato computacional para poderem ser reutilizadas pelo CAPP. Isso dificulta muito a automação da interpretação da peça.

Também, um outro problema a ser superado é a dificuldade em se alcançar a automação do planejamento de processo no caso de um escopo maior de peças.

Embora muitos pesquisadores em universidades e indústria têm se envolvido por muito tempo no desenvolvimento de sistemas CAPP generativos automáticos e integrados, a efetividade desses sistemas não é satisfatória e as deficiências ainda não estão solucionadas. Algoritmos propostos, embora numerosos, têm algumas limitações. Seu uso em ambientes industriais reais ainda está no mesmo nível, com sucesso limitado, e requer processistas experientes (ÖZTÜRK, 1997).

Quanto maior o escopo de peças que o sistema automático atende, torna-se mais difícil um aprofundamento da automação em detalhes que garanta grande aumento em produtividade, custos, qualidade, ou seja, esses sistemas acabam não justificando de forma convincente os custos e gastos de sua implementação (ainda, esses sistemas requerem alto custo de desenvolvimento).

A aplicação de técnicas como Inteligência Artificial (AI) para automatizar as atividades de planejamento de processo deve ser amplamente discutida antes de sua implementação em sistemas CAPP. Em uma conferência de 60 companhias americanas e européias patrocinada por *Houtzeel Manufacturing Systems (HMS)* em 1991, foi explorada a aplicação de inteligência artificial em CAPP. Muitos participantes investiram substanciais esforços no desenvolvimento de sistemas generativos automáticos baseados em AI, mas todos chegaram à conclusão que tais sistemas, embora tecnicamente viáveis, provêm inaceitavelmente baixos retornos em investimento, particularmente em se lidando com peças

com vários detalhes em geral ou operações de montagem. Entretanto, quando se tratam de grupos de peças ou operações de montagem similares, como pás de turbinas, esses sistemas CAPP com AI poderiam ser lucrativos (HOUTZEEL, 1998).

Assim, uma aplicação global de AI para sistemas CAPP generativos para o universo total de peças manufaturadas por uma companhia seria irrealístico. Entretanto, usando análise de Tecnologia de Grupo (GT), é possível chegar em um número limitado de famílias de peças onde um sistema especialista pode ser efetivo em custo (HOUTZEEL, 1998).

Dada a dificuldade em se obter um sistema automático geral, para se obter bons retornos após o desenvolvimento de sistemas automáticos é preciso analisar bem a situação específica de cada empresa. Caminhos alternativos em direção à automação devem ser investigados considerando a praticidade nas indústrias, além das considerações teóricas acadêmicas no assunto.

Os sistemas CAPP automáticos podem ser desenvolvidos com sucesso em indústrias onde as peças não apresentam formas radicalmente inovadoras mas que permitem uma grande variedade de alternativas no processamento automático, colocando o trabalho um pouco mais determinístico a encargo do computador. Isso permite resultados precisos, rápidos, pois o domínio não é tão amplo e o grau de automação é elevado, permitindo aumento de produtividade e qualidade na manufatura que justifique bem o custo de implementação do CAPP. Uma grande vantagem é que os processistas experientes não perdem muito tempo em tarefas mais fáceis de planejamento de processo, que não exigem muita especialidade humana, onde muitas vezes o roteiro de fabricação é até o mesmo, podendo assim dar assistência a tarefas que podem ser consideradas “mais nobres”.

1.2 Justificativa do tema

Pelo que foi mencionado até aqui, observa-se a importância dos sistemas CAD e CAPP integrados, mas acompanhados de muitas dificuldades. A saída está em se encontrar caminhos mais práticos, procurando resolver o problema por partes, e esquecer de tentar encontrar uma solução geral para a empresa logo no primeiro projeto.

Quando se restringe o escopo de peças para o qual o sistema atua, os dois problemas principais envolvidos na integração CAD/CAPP descritos anteriormente podem ser amenizados e ainda solucionados.

Torna-se então necessário achar quais os tipos de peças poderiam amenizar esses problemas e ao mesmo tempo serem manufaturadas por inúmeras indústrias. Novas peças

com topologias muito similares e tais que as possibilidades em sua forma ou características já são conhecidas, podem ser o escopo de peças para um sistema CAD/CAPP que proporciona aumentos efetivos de produtividade do planejamento de processo em um ambiente industrial real. Essa condição não é pouco freqüente, pois as empresas em geral possuem uma tecnologia ou produto *core* que garanta sua sobrevivência ou possível domínio do mercado. Muitas empresas não têm seus novos produtos e peças com uma forma muito ou radicalmente distinta. Uma padronização de formas e dimensões evitando uma variabilidade desnecessária proporciona facilidades na manufatura e melhorias em custo, qualidade e tempo. Além disso, muitos mecanismos ou peças na engenharia mecânica são básicos e padrões por já terem sido muito estudados e otimizados, como engrenagens, anéis, bronzinas, parafusos, etc., possuindo topologias ou formas básicas já definidas.

Introduzem-se aqui as *peças paramétricas*. São um grupo de peças em que a sua geometria, dados de qualidade e outras características sempre poderão ser completamente definidos por certos parâmetros (sempre os mesmos para um grupo considerado), porque todas as possibilidades em sua forma e categorias de características já são conhecidas *à priori*. Possuem topologias muito similares e sempre os mesmos *features* principais garantindo a forma básica da peça, e sobre eles a existência ou não de pequenos *features* secundários também conhecidos, com a finalidade de exercer funcionalidades locais na peça (por exemplo engrenagens, que podem ou não possuir rasgo de chaveta e/ou canal de óleo). Exemplos de peças paramétricas são parafusos, bronzinas, engrenagens, anéis, alguns elementos de máquinas, algumas autopeças, e várias outras. Os parâmetros podem ser, além das dimensões da peça, tolerâncias, rugosidades, número de dentes de engrenagem, etc.

Os desenhos de produto de novas peças paramétricas podem ser automatizados com o uso de softwares CAD paramétricos, que permitem a regeneração automática de modelos construídos através de um modelamento paramétrico ou baseado em restrições (ver item 2.5.4.1).

Quando as peças são paramétricas o problema descrito anteriormente de sua interpretação automática do ponto de vista do planejamento do processo é amenizado porque a forma da peça em função dos valores dos parâmetros é sabida. Assim, com os valores dos parâmetros o sistema pode reconhecer as suas dimensões e toda a sua geometria, além de outras características, podendo interpretá-las. Portanto, os dados de entrada para o CAPP automático podem ser apenas esses parâmetros, e a integração no sentido CAD/CAPP pode ser limitada à sua transferência do CAD para o CAPP. Assim como a integração no sentido CAPP/CAD para a geração de ilustrações de resultados de planejamento, como croquis de

fabricação ou outros desenhos, limita-se à transferência dos parâmetros do CAPP para o CAD.

A automação do planejamento de processo também pode ser facilitada quando as peças são paramétricas. Segundo LAU & JIANG (1998), componentes com geometria similar também têm planos de processo similares. Assim, os planos de processo de peças paramétricas são similares. Uma vez que as formas básicas das peças paramétricas são fixas, que todos os seus possíveis detalhes são conhecidos e que os seus planos de processo são similares, empresas que manufaturam esse tipo de peça já possuem resultados de planejamento de processo mais controlados, estudados e otimizados em função dos valores dos parâmetros e com base em seus recursos de manufatura. Isso torna mais fácil realizar um trabalho de sistematização para alcançar a automação de algumas atividades do planejamento de processo como por exemplo a elaboração dos roteiros de operações e dos croquis de fabricação. Os croquis podem ser regenerados automaticamente em softwares CAD paramétricos, com os valores dos parâmetros calculados no CAPP também de forma automática. De uma forma resumida, as peças paramétricas permitem a parametrização de algumas atividades de projeto detalhado e de planejamento de processo.

Há um grande número de indústrias que manufaturam peças paramétricas. E os resultados automáticos gerados por um sistema integrado CAD/CAPP para esse escopo de peças podem proporcionar aumentos efetivos de produtividade em um ambiente industrial real.

Segundo LAUDON, K. & LAUDON, J. (1998), para a construção e desenvolvimento de soluções integradas em organizações, o uso de pacotes de software de aplicação comerciais é uma alternativa de estratégia, tendo vantagens como o trabalho reduzido em projeto, programação, instalação e manutenção, economia de tempo e custo no desenvolvimento de aplicações comuns, e redução da necessidade de recursos internos de sistemas de informação.

Assim, o tema ou o foco deste trabalho está na integração de sistemas CAD e CAPP comerciais para uso com peças paramétricas, visando apoiar e otimizar as atividades de detalhamento do processo de desenvolvimento de produto relacionadas ao projeto e ao planejamento do processo.

1.3 Questões

Diante do tema, algumas perguntas podem ser levantadas e úteis para a estrutura e direcionamento do trabalho:

- É viável tecnicamente desenvolver uma solução CAD/CAPP integrada para peças paramétricas?
- Que necessidades do desenvolvimento de produto essa solução pode satisfazer e apoiar?
- Que arquitetura e esquema do sistema seria apropriada para satisfazer essas necessidades?
- Que limitações os sistemas comerciais apresentam como oposição às necessidades desejadas?
- Quais as formas de integração CAD/CAPP passíveis de serem realizadas com sistemas comerciais?

Assim, foi definido o objetivo do trabalho de modo que esta pesquisa esteja no contexto da problemática formulada acima.

1.4 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução CAD e CAPP integrada para uso com peças paramétricas visando apoiar atividades de detalhamento do processo de desenvolvimento de produto relacionadas ao projeto detalhado e ao planejamento de processo, utilizando softwares de aplicação comercialmente disponíveis no mercado.

1.5 Metodologia

Pelo objetivo descrito, esta pesquisa é caracterizada como uma pesquisa-ação, porque o desenvolvimento está ligado a um ato de criação, de ação, apresentando uma solução.

Segundo CHIZZOTTI (1991), “a pesquisa-ação se propõe a uma ação deliberada visando uma mudança no mundo real, comprometida com um campo restrito, englobado em

um projeto mais geral e submetendo-se a uma disciplina para alcançar os efeitos do conhecimento.”

Para DANE (1990), a pesquisa ação pode envolver qualquer um dos outros métodos de pesquisa, mas adiciona ainda o requisito de achar uma solução, de fazer algo. A pesquisa ação, em geral, é um aspecto extremamente importante da ciência, para ela é através da pesquisa ação que se pode testar aplicações de outros resultados de pesquisa (DANE, 1990).

Visando atingir o objetivo do trabalho, foi delineado um método particular de ação. O método é baseado em um modelo para o processo de desenvolvimento de sistemas de informação afetado pelo uso de pacotes de software de aplicação comerciais, segundo a referência LAUDON, K. & LAUDON, J. (1998). O conhecimento em projeto e em planejamento de processo, na integração desses processos, a problemática envolvida, e o contexto no processo de desenvolvimento de produto como um todo também afetou o delineamento do método e permeou o desenvolvimento do trabalho.

O método resultou nas etapas (ou passos) para o desenvolvimento da solução, ordenadas de acordo com a FIGURA 1 seguinte:

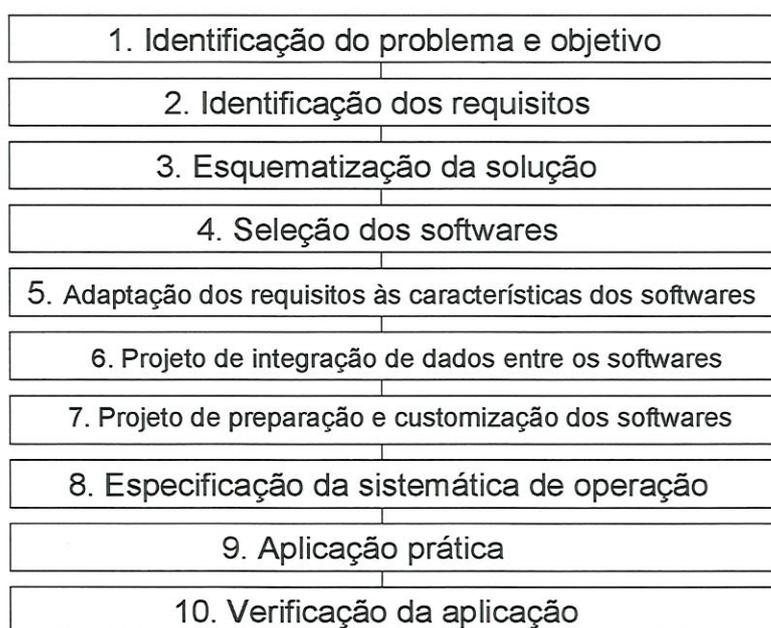


FIGURA 1: Etapas do trabalho

As etapas são descritas a seguir:

1. **Identificação do problema e objetivo:** Após um estudo de problemas em sistemas correlatos existentes, especificam-se, através da importância e viabilidade, os objetivos do desenvolvimento do projeto. Nesta etapa também é restringido o escopo de peças com o qual o sistema trabalha. A importância desta restrição deve-se à diminuição da complexidade de desenvolvimento da solução e restrição da sua faixa de atuação a um escopo de peças que seja viável e de grande utilidade para muitas empresas.
2. **Identificação dos requisitos:** Levantam-se os requisitos para o sistema, entre eles as suas funções, de modo que possam dar apoio a algumas atividades de detalhamento do desenvolvimento de produto relativas a projeto detalhado e planejamento de processo e otimizá-las. Esses requisitos direcionam o desenvolvimento de modo a otimizar o sistema resultante. São identificados considerando-se o contexto maior do desenvolvimento de produto e a partir do conhecimento do autor deste trabalho no assunto, adquirido principalmente durante o processo de revisão da bibliografia e da experiência adquirida durante o período de desenvolvimento do trabalho. Por ser uma pesquisa-ação, o trabalho utiliza a forma de raciocínio "conhecer-para-agir" ou "conhecer-para-fazer" ao longo de seu desenvolvimento.
3. **Esquematização da solução:** discutem-se alternativas de solução e desenham-se esquemas para o sistema visando o cumprimento dos requisitos levantados de uma maneira viável.
4. **Seleção dos softwares:** Selecionam-se os softwares que possam viabilizar o esquema da solução definido na etapa anterior e satisfazer a maior parte de seus requisitos. Paralelamente devem ser viáveis levando-se em consideração parâmetros como custo, qualidade, facilidade de manipulação, difusão em outras empresas, etc.
5. **Adaptação e conformação dos requisitos às características e funcionalidades dos softwares:** Segundo LAUDON, K. & LAUDON, J. (1998), os pacotes de software de aplicação comerciais não podem satisfazer todos os requisitos de todas as organizações em particular. Assim, em vez de adaptar as especificações da solução diretamente aos requisitos, como na metodologia tradicional de desenvolvimento de sistemas de informação, tenta-se aqui moldar os requisitos para conformar com as facilidades e funcionalidades que podem ser oferecidas pelos softwares escolhidos. Como descrito no final do item 1.2, há grandes vantagens em se utilizar softwares comerciais no desenvolvimento da solução.

Algumas organizações têm requisitos únicos, e os desenvolvedores de pacotes de software antecipam esse problema provendo modos de customização que não alteram o software básico nem destroem a sua integridade.

6. **Projeto de integração de dados entre os softwares:** Estudam-se formas alternativas para a integração dos dados entre os softwares, adotando-se a forma mais viável. A integração deve obedecer ao esquema do sistema delineado.
7. **Projeto de preparação e customização dos softwares:** Estuda-se o projeto para a customização e preparação dos softwares para a viabilização da integração de dados e para deixá-lo pronto para o uso.
8. **Especificação da sistemática de operação:** Com os softwares já escolhidos e o projeto de integração de dados e de customização e preparação dos softwares já realizados, nesta etapa é preciso, antes de começar a preparação do sistema na aplicação prática, especificar o melhor caminho para o usuário seguir manipulando o sistema para que cumpra com seus objetivos. Assim, as funções especificadas anteriormente podem ser comprovadas por meio da sistematização. Em uma empresa, a sistemática operacional vai redesenhar os seus procedimentos organizacionais, daí a importância das etapas anteriores, que direcionam esta.
9. **Aplicação prática:** O projeto desenvolvido terá uma aplicação ou um exemplo prático. Isso permite a realização dos resultados visando os quais a solução foi desenvolvida. É necessária aqui a escolha de um escopo de peças exemplo (dentro do escopo maior que o sistema suporta - peças paramétricas) para a preparação do sistema. Uma empresa que utiliza esta solução pode subsequentemente escolher um outro escopo de peças ou família, também dentro do que o sistema suporta, e preparar a solução para o seu funcionamento. A importância da solução é que ela permite fazer um trabalho gradual de ampliação do escopo de peças até se chegar em um alto nível de rendimento na maior parte da empresa.
10. **Verificação da aplicação:** Verificam-se os resultados das funções da solução obtidos a partir da execução da sistemática operacional. A verificação é realizada qualitativamente para que seja útil também em outras aplicações envolvendo diferentes escopos de peças paramétricas.

A **aplicação prática** foi realizada no Laboratório de Sistematização e Integração da Manufatura da Fábrica Integrada Modelo (FIM), na sede do Núcleo de Manufatura

Avançada (NUMA), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, e foi organizada de acordo com as etapas ilustradas na FIGURA 2 seguinte:

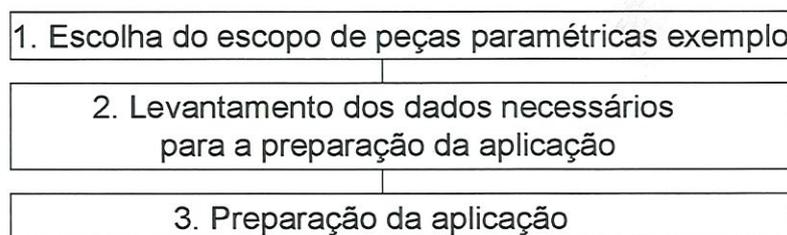


FIGURA 2: Etapas da aplicação prática

As etapas da aplicação prática são descritas a seguir:

1. **Escolha do escopo de peças paramétricas exemplo:** Escolhe-se o escopo das peças paramétricas que será suportado por esta aplicação. Este será considerado no levantamento dos dados necessários para a preparação da aplicação.
2. **Levantamento dos dados necessários para a preparação da aplicação:** Levantam-se todos os dados necessários das peças do escopo escolhido para que a preparação da aplicação possa ser realizada, com base nas informações contidas nos respectivos desenhos de produto e planos de processo até então utilizados.
11. **Preparação da aplicação:** Preparam e configuram-se os softwares, e realiza-se a integração de dados. Isso permite o funcionamento da solução e a concretização das suas funções para as peças em questão.

O item seguinte deste capítulo introdutório descreve como o trabalho está organizado e apresentado.

1.6 Apresentação deste trabalho

O capítulo 1 é a introdução do trabalho e apresenta primeiramente as suas justificativas. Elas começam descrevendo a importância da integração CAD/CAPP em geral no desenvolvimento de produto. Como esta integração apresenta vários problemas, estes são apresentados e discutidos no item 1.1, para se poder definir mais sabiamente o tema do

trabalho com a sua importância, apresentada no item 1.2. Dentro do tema, formularam-se algumas questões no item 1.3 que podem estruturar melhor a pesquisa. O objetivo é definido no item 1.4 de modo que a pesquisa envolva as questões formuladas. A seguir no item 1.5 é apresentada a metodologia que foi utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica detalhada. O capítulo 3 apresenta a integração CAD/CAPP para peças paramétricas no contexto de uma integração CAD/CAPP genérica, para uma melhor localização do trabalho e ainda, por estar descrita em formas de uso desses sistemas integrados, ajudar na definição de alguns dos requisitos ou funções da solução. O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do trabalho em si e a sua verificação. O capítulo 5 apresenta as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão detalhada da bibliografia no que tange o tema do trabalho, que foi tomada como o conhecimento básico necessário.

2.1 O processo de desenvolvimento de produto

Neste item são apresentados alguns tópicos importantes a respeito do processo de desenvolvimento de produto, que faz parte do contexto maior do trabalho.

2.1.1 O desenvolvimento de produto e suas características

Pode-se definir desenvolvimento de produto como sendo um processo de negócio compreendendo desde a idéia inicial e levantamento de informações de mercado até a homologação final do produto e processo e transmissão das informações sobre o projeto e o produto para todas as áreas funcionais da empresa (OMOKAWA, 1999).

Ou, segundo CLARK & FUJIMOTO (1991): processo pelo qual uma organização transforma dados sobre oportunidades de mercado e possibilidades técnicas em bens e informações para a fabricação de um produto comercial.

É importante conhecer algumas características particulares do processo de desenvolvimento de produto, o que possibilita o melhor entendimento desse processo e permite que se faça uma análise para a sua integração e otimização. O processo de desenvolvimento de produto envolve praticamente todos os setores funcionais da organização, além de influenciar o trabalho de praticamente todas as pessoas da organização. É um processo que não se repete sempre da mesma maneira, podendo sempre apresentar dificuldades, problemas e históricos bem particulares. Assim, as características da organização que influenciam este processo podem referir-se a vários pontos da organização,

além da atividade de projeto em si. Então para desenvolver uma abordagem abrangente, o enfoque sobre desenvolvimento de produto pode-se pautar no conceito de *processo* e de *fluxo de informações* (AMARAL, 1997).

Um aspecto particular do processo de desenvolvimento de produto, é que a natureza de suas atividades baseia-se num ciclo “projetar-construir-testar”. Essa característica torna extremamente importante a integração e sobreposição das fases entre as atividades, pois cada uma está em contínua mudança e pode influenciar a outra. O re-trabalho também fica mais tolerado com a integração e sobreposição das fases, ficando difuso no meio das alterações “normais”. Clark & Fujimoto também consideram importante a consistência dos detalhes, ou seja, a harmonia entre o todo e cada detalhe que um bom projeto deve possuir, implicando numa interdependência entre as pessoas que realizam diferentes atividades. Como a natureza do processo é baseada num ciclo de resolução de problemas, o desempenho do projeto depende tanto da eficiência na resolução de cada problema como do gerenciamento da integração entre as atividades (AMARAL, 1997).

Segundo ROZENFELD (1997) é conhecido que o grau de incerteza no início do desenvolvimento é bem elevado, diminuindo com o tempo, mas é justamente no início que se seleciona a maior quantidade de soluções construtivas. As escolhas de alternativas ocorridas no início do ciclo de desenvolvimento são responsáveis por 85% do custo do produto final. O custo de modificação aumenta ao longo do ciclo de desenvolvimento, pois a cada mudança um maior número de decisões já tomadas podem ser invalidadas, e os custos com elas tidos inutilizados. O processo de desenvolvimento seqüencial tem a desvantagem de fazer com que o número de alterações ocorra muito tardiamente.

Para um melhor conhecimento a respeito do processo de desenvolvimento de produto, são descritas algumas características das suas fases no item 2.2.

2.1.2 Conceitos de integração e a sua importância para o desenvolvimento de produto

A integração, em última análise, tem o potencial de beneficiar o desenvolvimento de produto em flexibilidade e receptividade, tempo-para-mercado, organização, qualidade e custos.

No ambiente turbulento e competitivo onde a velocidade é essencial, a integração tem-se destacado como um meio eficaz e fundamental para um melhor desempenho no desenvolvimento de produto. Permite que *as informações certas estejam disponíveis na hora certa, para as pessoas certas e no lugar certo*. Evidências sugerem que integração reduz

lead time e substancialmente aprimora produtividade na engenharia (CLARK & FUJIMOTO, 1991). A competição global e as condições de mercado flutuantes trazem a necessidade de se gerenciar mudanças organizacionais e operacionais dentro de companhias. Também, a complexidade de novos produtos requer um melhor gerenciamento de complexos processos de negócio em muitos projetos de natureza colaborativa. A integração conta com um livre mas controlado fluxo de informação e conhecimento, e a coordenação de ações (VERNADAT, 1996).

A integração tem o potencial de melhorar a *flexibilidade* e a *receptividade* no sentido de facilitar para que a informação e o conhecimento internos e externos sejam utilizados para resolver conflitos, necessidades e requerimentos inesperados para o desenvolvimento de produto, possibilitando uma resposta eficaz. Por isso uma empresa integrada pode ter processos e procedimentos não-rígidos e mais “abertos” a novidades, tornando-se uma empresa mais ágil.

O conceito de integração é relativamente abstrato, e seu intuito é realmente esse pois também pode envolver processos complexos que por sua vez chegam a envolver objetos, pessoas, sistemas, etc. Integração significa colocar junto componentes heterogêneos para formar um inteiro sinérgico, segundo a definição de VERNADAT (1996). Significa, segundo o autor deste trabalho, achar relações e canais de comunicação entre componentes diferentes de modo que uma mudança em um reflita em outros e informação seja passada com um fim de saber que atitudes tomar de modo que os objetivos do inteiro sejam atingidos. Os processos que viabilizam isso devem permear o inteiro sinérgicamente para atingir os objetivos com maior facilidade.

Segundo VERNADAT (1996), a integração de todos os componentes de uma empresa são *condicionados pela integração de seus processos* (porque esses já englobam todo o fluxo de informação, de material e de controle da empresa). Então, pode-se concluir que a integração de todo o desenvolvimento de produto é a de seus sub-processos (processos dentro do desenvolvimento de produto) e também a integração com os outros processos de negócio da empresa (por requerer funções de outros departamentos). Portanto, também se pode utilizar a definição de *integração de empresa*, que é a de seus processos de negócio, para a do desenvolvimento de produto.

Integração de empresa, segundo VERNADAT (1996), consiste em facilitar os fluxos de informação, controle e material através de fronteiras organizacionais conectando todas as funções necessárias e entidades funcionais heterogêneas para aprimorar comunicação, cooperação e coordenação dentro da empresa assim esta se comporta como um inteiro integrado, melhorando sua produtividade global, flexibilidade e capacidade para

gerenciamento de mudança. Entidades funcionais heterogêneas a serem integradas são sistemas de informação, dispositivos, aplicações e pessoas.

No processo de desenvolvimento de produto, integração significa, segundo CLARK & FUJIMOTO (1991), ligar ciclos de solução de problemas, trazendo grupos funcionais a estreitos relacionamentos de trabalho, e alcançando um encontro das mentes em conceito, estratégia e execução. Para alcançar um processo de desenvolvimento integrado, gerentes devem trazer pessoas juntas em tempo, espaço, conceito, e atitude; reduzir o tamanho dos times de desenvolvimento; ampliar perícias individuais; e simplificar e horizontalizar a organização. Para isso, tais ações requerem o suporte de comunicação aprimorada, investimentos em treinamento, e alimentar responsabilidade, confiança e crédito pela organização.

Para se alcançar tudo isso, existem várias técnicas e métodos visando a integração de uma empresa ou do desenvolvimento de produto, acompanhados de respectivos enfoques e maneiras de enxergá-la, como integração de negócios, de aplicações, de sistemas, integração fraca ou plena, integração horizontal ou vertical, integração intra ou inter empresa, integração de sistemas legados, etc. Uma discussão mais detalhada sobre isso é muito extensa e foge do escopo desta revisão, podendo ser ricamente encontrada em VERNADAT (1996).

2.1.3 Engenharia Simultânea

Para tentar diminuir o grau de incerteza no início do ciclo de desenvolvimento de produto, que como mencionado no item 2.1.1 é uma característica desse processo, muitas empresas procuram adotar a filosofia de trabalho da Engenharia Simultânea (ES). Ela foi desenvolvida visando alcançar-se os objetivos maiores do desenvolvimento de produto, que são o aumento da qualidade do produto, a diminuição do ciclo de desenvolvimento, e a diminuição dos custos envolvidos. Assim, o seu conceito se ampliou e englobou todas as práticas que permitem se alcançar esses objetivos.

A Engenharia Simultânea pode então ser definida como uma filosofia de atuação no desenvolvimento ou alteração de novos produtos, visando (ROZENFELD, 1997):

- ◆ aumento da qualidade do produto, com foco no cliente
- ◆ diminuição do ciclo de desenvolvimento
- ◆ diminuição dos custos envolvidos

Um princípio básico é o paralelismo das atividades. Segundo ROZENFELD (1997), deve haver uma sinergia entre seus agentes, que devem trabalhar em equipes multifuncionais formadas por pessoas de diversas áreas da empresa. A equipe deve crescer e diminuir ao longo de sua existência, mantendo sempre um mesmo núcleo de pessoas que acompanham o desenvolvimento. Clientes e fornecedores devem fazer parte dessa equipe durante algumas atividades, quando se trabalhar com cadeia de suprimentos, dependendo da posição da empresa na cadeia. Recursos, métodos e técnicas integradas (como QFD, FMEA, DFX, Tagushi, etc.) devem suportar o trabalho da equipe. O foco do trabalho deve sempre estar focalizado nas necessidades do cliente, e o projeto deve estar voltado para a manufatura.

Uma outra definição é a de Clausing, 1994: Engenharia Simultânea consiste no aumento de clareza e unidade durante o desenvolvimento de produto. Clareza significa aumento no processo de simultaneidade, focado na qualidade, custos e distribuição, com ênfase na satisfação do cliente. Unidade significa uma melhora na integração da organização, no envolvimento dos membros do time e em relacionamentos estratégicos com os fornecedores (OMOKAWA, 1999).

A Engenharia Simultânea e a integração estão intimamente ligadas. Não se consegue trabalhar com a primeira sem a existência efetiva da segunda para suportá-la. Em desenvolvimento de produto, a integração por si só tem seus benefícios, mas para ser eficaz também deve ser direcionada visando a Engenharia Simultânea.

2.1.4 Dimensões do desenvolvimento de produto na visão por processos

Segundo ROZENFELD (1997), para saber qual é a melhor decisão a tomar, é necessário ter uma visão holística da empresa, uma “imagem única”, sintética, em que se possa enxergar todos os seus elementos, que podem ser relacionados a visões parciais ou dimensões, abrangendo suas *estratégias, atividades, informações, recursos e organização*, e também suas inter-relações. Essas dimensões da empresa, por a representarem na visão por *processos*, também podem ser consideradas para o processo de desenvolvimento de produto. A organização seria um conceito mais abrangente do que o normalmente conhecido, considerando além da estrutura organizacional e suas inter-relações, a sua cultura, pessoas e sua qualificação, formas de comunicação, e a capacidade de aprendizado da organização. Recursos seriam os financeiros utilizados pela empresa, equipamentos de produção e de trabalho, métodos e técnicas empregados, sistemas, ferramentas, hardware, software, etc.

Delineando as estratégias, as atividades, as informações, os recursos e a organização do desenvolvimento de produto de uma forma inter-relacionada e integrada permeada pela filosofia da Engenharia Simultânea, pode-se traçar o modelo de referência, que é um meio de representar um processo de negócio, para se ter uma “imagem única” desse processo, para facilitar melhores tomadas de decisão e propiciar um direcionamento de trabalho para se garantir bons resultados.

Pode-se perceber, através deste capítulo, a importância de se poder enxergar todo o desenvolvimento de produto de uma maneira holística, clara e integrada, tanto para a gerência como para todos os outros participantes envolvidos no processo.

2.2 Localização de projeto e planejamento de processo no desenvolvimento de produto

De acordo com o modelo de referência da Fábrica Integrada Modelo - FIM, o desenvolvimento de produto é caracterizado pela existência de seis fases: concepção, conceituação, projeto de produto e processo, homologação do produto, homologação do processo, e ensinar empresa. A FIGURA 3 a seguir mostra uma representação desse processo de negócio em uma visão analógica e em alto nível, e a localização do projeto e do planejamento de processo.

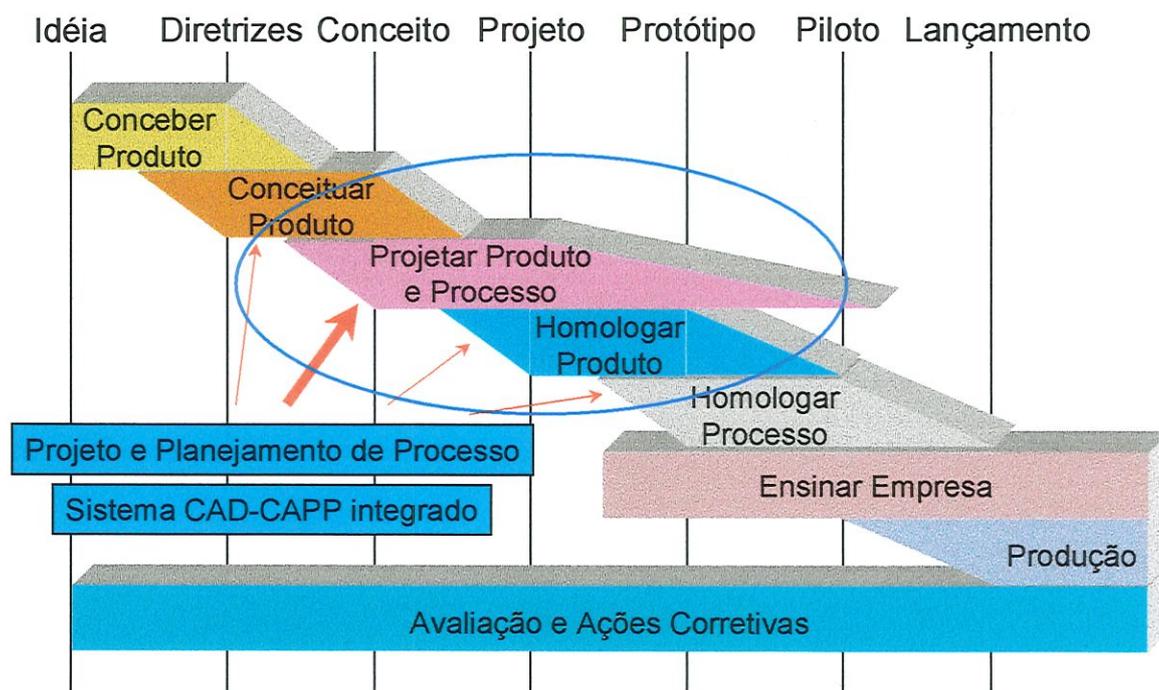


FIGURA 3: Localização de projeto e de planejamento de processo no desenvolvimento de produto

A fase de *concepção* tem início com o surgimento de idéias de novos produtos vindas de informações de mercado, análises realizadas pelos dirigentes, opinião dos clientes, etc., e caracteriza-se em “pensar na idéia” e analisar sua viabilidade definindo as diretrizes do produto.

A *conceituação* consiste em complementar as diretrizes obtidas anteriormente, definindo detalhadamente todas as características técnicas do produto.

O *projeto* e o *planejamento de processo* estão localizados principalmente na fase de *projeto de produto e processo*, quando se realiza o detalhamento do produto, elaborando novos desenhos e processos em detalhes, fazendo um trabalho iterativo com cálculos e avaliações das características determinantes (como resistência mecânica, vibrações, etc.). Também são definidos os potenciais de falhas do projeto e processo, que serão verificados na homologação do produto e do processo respectivamente. Nesta fase de detalhamento também são obtidas outras informações como fluxo de processo, carta de controle estatístico de processo, croquis de fabricação, de *set-up* de equipamento, de inspeção, lista de ferramental, etc.

Na fase posterior de *homologação do produto* são realizadas atividades envolvendo planejamento de testes do produto, plano de processo para o protótipo, aquisição de itens e serviços externos, planejamento, fabricação e montagem do protótipo, realização dos testes e avaliação dos resultados, e finalmente homologação do produto com base na avaliação dos resultados e tendo-se em mãos as possíveis falhas que foram levantadas na fase de projeto do produto.

Na *homologação do processo*, define-se um cronograma de implantação do produto na empresa, fabrica-se um lote piloto e a seguir detalha-se os planos de montagem. Verifica-se a capacidade da empresa em obter o produto desejado e as falhas de processo (FMEA de processo) tomando-se as medidas pertinentes para eliminá-las.

A fase de *ensinar empresa* consiste em obter as informações finais sobre o produto (manuais de manutenção, aplicação, etc.) para com isso realizar cursos e palestras para o pessoal de marketing, vendas, assistência técnica, planejamento e fabricação, etc. para divulgar os conceitos e características do novo produto. Desenvolvem-se sistemas de informação (softwares) relacionados com o produto para apoio a outras atividades da empresa (vendas, assistência técnica) procurando reaproveitar as informações das outras fases (ROZENFELD, 1997).

Apesar da apresentação em fases o importante é garantir que elas tenham uma grande sobreposição, como na FIGURA 3 acima, ou seja, uma atividade característica de uma fase pode ser iniciada antes que a fase anterior seja finalizada, nem que essa atividade seja realizada a grosso modo ou parcialmente, como um auxílio a atividades da fase anterior e a fim de se eliminar incertezas no início do ciclo de desenvolvimento, e também para já poder levar adiante o ciclo de desenvolvimento sem precisar esperar por validações de decisões e diretrizes. Isso desde que alguma informação necessária ao seu desenvolvimento já esteja disponível.

Como mencionado, o projeto e o planejamento de processo estão localizados principalmente na fase de *projeto de produto e processo*. Levando-se em consideração o descrito no parágrafo anterior, atividades relacionadas a projeto e planejamento de processo (ou a utilização de um sistema CAD/CAPP integrado) também podem ser desempenhadas na fase anterior de *conceituação*. Na conceituação pode-se ir fazendo um trabalho de visualização sem compromisso do produto e do processo a fim de se validar os conceitos. Também tais atividades (ou tal sistema integrado) podem ser desempenhadas nas fases de *homologação do produto* e *homologação do processo*, como por exemplo as atividades de geração do plano de processo do protótipo e detalhamento dos planos de montagem, respectivamente.

Percebe-se que, de um modo geral, as atividades de projeto e planejamento de processo (ou um sistema CAD/CAPP integrado) localizam-se no “corpo” do desenvolvimento de produto, e têm um grande papel na realização do mesmo.

Ressalta-se que a localização de projeto e planejamento de processo apresentada aqui não é rígida, pois depende do que cada empresa (ou cada autor) considera como sendo o projeto ou cada fase.

2.3 O processo de projeto

A revisão sobre projeto apresentada aqui tem como fonte a literatura básica sobre o assunto. Alguns autores consideram essa visão de projeto como o desenvolvimento de produto em si, outros consideram o projeto apenas como algumas atividades operacionais dentro do desenvolvimento de produto. De qualquer forma, a visão do projeto apresentada aqui difere da visão de desenvolvimento de produto apresentada no item anterior.

O desenvolvimento de produto foi definido a partir da modelagem dos processos de negócio das empresas, por isso incorporou uma visão mais “de mercado” e administrativa no delineamento de suas atividades, informações, recursos, organização e estratégia, e é pouco mais abrangente por considerar algumas atividades a mais. Não diz respeito apenas à engenharia, mas também às outras áreas funcionais da empresa para uma maior integração, visão mais ampla e para evitar más conseqüências das decisões tomadas no que tange essas áreas. No entanto, o enfoque de projeto apresentado a seguir apresenta importantes conceitos básicos já muito pesquisados e tem grande importância como fundamentação teórica para delineamento e execução das atividades operacionais dentro do desenvolvimento de produto que dizem respeito ao projeto.

2.3.1 Conceitos básicos

Os humanos vêm projetando objetos mecânicos há muito tempo, e o motivo do estudo desse processo é a contínua necessidade de produtos novos, de custo efetivo, e de alta qualidade. Devido à relação entre o conceito e o produto final ser de “um para infinitos”, observa-se a grande importância do estudo do projeto (ULLMAN, 1992).

O processo de projeto de engenharia mecânica é um processo complexo e cognitivo ainda não bem entendido. Sendo o espaço de solução usualmente extremamente grande, o

projetista tem que seguir uma certa estratégia ou método para chegar a um projeto bem sucedido (SALOMONS, *et al.*, 1993).

Segundo HOUTEN (1991), projeto em engenharia mecânica é o mapeamento (tradução) dos requisitos funcionais do produto em representações que descrevem os componentes do produto em termos de formas precisamente definidas e materiais. Ou, segundo ULLMAN (1992), o processo de projeto é um mapa de como chegar da necessidade de um objeto específico ao produto final. Ou projeto de engenharia é a realização parcial de um conceito do projetista (CHANG & WYSK, 1985).

Segundo KOESTLER (1964) *apud* HOUTEN (1991), projeto é um ato de criação. Requer que o projetista possua duas qualidades distintas: originalidade e habilidade. Nota-se que essas definições mais antigas (Chang e Koestler) ainda não consideravam o conceito de trabalhar em times visando maior integração, referindo-se sempre ao “projetista”.

Segundo HOUTEN (1991), originalidade é a habilidade de gerar novos conceitos válidos sem ter conhecimento consistente suficiente. Muitos cientistas concordam que a consciência tem o maior papel, e que conceitos originais emergem como resultado de uma mistura de processos de pensamento consciente e sub-consciente, e que soluções originais vêm a acontecer em um “flash”, geralmente durante um período de relaxamento depois de uma ocupação intensiva inicial com um problema específico.

Habilidade ou perícia é a capacidade de aplicar conceitos conhecidos. É caracterizado por repetitividade e conservação de conhecimento. A maior parte de um trabalho de projeto geralmente consiste de trabalho rotineiro que pode ser realizado de um jeito processivo.

O balanço entre originalidade e perícia é muito dependente do problema. No projeto de produtos industriais, muita originalidade pode às vezes ser pior que muito pouca (HOUTEN, 1991).

2.3.2 Projeto “clássico” versus projeto moderno

Analisando a literatura mais antiga em projeto, como DIXON (1966), WOODSON (1966), e PITTS (1973), e a moderna, observa-se que a filosofia envolvida no processo de projeto era um pouco diferente da de hoje. Algumas características das fases do projeto “clássico” são, segundo PITTS (1973) e RUFFINO (1997)² :

² RUFFINO, R.T. (1997). O processo de projeto. (transparências da disciplina de Pós Graduação: “Projeto Mecânico”). Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- Necessidade: Os próprios projetistas fazem-se as perguntas entre eles: o quê, por quê, quando, onde, como, para definir qual a necessidade.
- Especificação: O projetista que deve fazer e não o usuário. Inclui lista dos parâmetros essenciais. Ex. Armário de “madeira” para ferramentas. Inclui características quantificáveis (todas grandezas físicas: potência, comprimento, força, etc.) e não quantificáveis (aparência, segurança habilidade do usuário, manutenção, etc.).
- Especulação: Busca-se muitas alternativas de solução. Quanto mais melhor (o ideal é ter mais de cem), para se poder avaliar posteriormente a melhor solução. Para essa busca tem-se como procedimento a estimulação da imaginação (discussão em grupo, observação do modelo lógico, análise da bibliografia, congressos, seminários. etc.).
- Avaliação: Avaliação de todas as alternativas de solução. Para isso tem-se critérios, cuidados plenos, recursos envolvidos disponíveis (humanos, materiais, financeiro) e compatibilidade.
- Síntese: Preparação e execução dos desenhos. Em três estágios: cálculo das quantidades, layout do projeto, detalhamento total.

As fases do projeto de produto encontradas na literatura moderna são, segundo ULLMAN (1992):

- Desenvolvimento/Planejamento da especificação
- Projeto conceitual
- Projeto do produto

Algumas características das fases de projeto do produto segundo a literatura moderna são descritas na visão sistemática do projeto, no item 2.3.4.

A grosso modo, as fases do projeto segundo a literatura antiga são praticamente as mesmas das da literatura moderna. Mas a diferença é basicamente uma: a filosofia de trabalho no processo, além de algumas técnicas que foram introduzidas visando satisfazê-la. O mercado não era tão competitivo como é nos dias de hoje. Isso não forçou com que em projeto e desenvolvimento de produto o foco fosse principalmente no cliente. A voz do cliente não influenciava tanto nas decisões de especificação, conceituação e projeto detalhado do produto, ficando essas decisões a encargo das idéias dos projetistas. Devido à menor competitividade, o tempo de projeto não era tão decisivo como é hoje, e as fases de projeto eram sequenciais por essa restrição não ser tão forte. Falava-se muito do inventor, além do engenheiro projetista, e a diferença básica entre os dois era o limite de tempo

disponível. Hoje pouco se fala do inventor. Atualmente, com uma competitividade acirrada, a Engenharia Simultânea, discutida no item 2.1.3, é uma filosofia já muito difundida nas empresas em projeto e desenvolvimento de produto.

Segundo ULLMAN (1992), o projeto do produto consiste nas três primeiras fases do conceito mais abrangente de *ciclo de vida do produto*, que consiste de seis fases:

- Desenvolvimento/Planejamento da especificação
- Projeto conceitual
- Projeto do produto
- Produção
- Serviço
- Retirada do produto

O conceito de desenvolvimento de produto abrange desde a estratégia empresarial e necessidades de mercado para a concepção da idéia inicial, até a formalização de todos os documentos relativos ao produto, incluindo planos de processo, manuais, etc. Também inclui a produção do lote piloto para a homologação do processo, mas não a produção em si, que pode ser um outro processo de negócio da empresa. Portanto, o desenvolvimento de produto é mais abrangente que o projeto e menos que o ciclo de vida do produto.

2.3.3 O papel da função no processo de projeto

Função é considerada como o que um objeto-projeto (ou modelo, ou resultado do projeto - peças individuais ou montagens) tem que fazer, ou sua intenção de comportamento. Projetistas geralmente pensam em funções antes de considerar a geometria. Funções podem existir em diferentes níveis de abstração, de acordo com a fase de projeto em que estão. Nas fases preliminares, as funções geralmente são independentes do princípio de trabalho do objeto-projeto, ou seja, o princípio de trabalho ainda não foi determinado, ainda não pode ser determinado em função da função. Por exemplo, se uma função de um produto for consumir pouca energia e ser rápido, ainda não se pode saber como será seu princípio de trabalho, se é com motor elétrico ou a combustão por exemplo. E nas fases adiantadas do projeto, onde as funções são detalhadas, estas ficam cada vez mais dependentes do princípio de trabalho que foi escolhido. Podem ser distinguidos três níveis de abstração de funções:

- *Funções gerais*: São restringidas em número, agem no problema, energia ou informação e são independentes do princípio de trabalho (ROTH, 1982³ *apud* SALOMONS *et al.*, 1993);
- *Funções especializadas*: Não são restringidas em número, agem em forças, momentos, etc. Ainda são independentes do princípio de trabalho. (ROTH, 1982 *apud* SALOMONS *et al.*, 1993);
- *Funções dependentes do princípio de trabalho*: São inerentes ao princípio de trabalho escolhido e são desempenhadas pelos componentes da montagem. Ainda podem ser decompostas em sub-funções (SALOMONS *et al.*, 1993).

2.3.4 Projeto - visão sistemática

Para deixar o processo de projeto mais eficiente, várias metodologias de projeto foram propostas. Um dos pioneiros foi Rodenacker, que introduziu um método baseado na modelagem da estrutura de função e nas propriedades funcionais do produto (RODENACKER, 1971⁴ *apud* HOUTEN, 1991). Uma *survey* em projeto sistemático e metodologias de projeto formais é apresentada por PAHL (1984)⁵ *apud* HOUTEN (1991). O enfoque de Pahl, que é mostrado aqui, está incorporado nas diretrizes do German VDI 2222 para projeto sistemático.

Embora o enfoque de projeto sistemático não reflète as observações de Ullman com respeito a real seqüência de tarefas, que caracteriza o projeto em termos de tarefas concorrentes e entrelaçadas, os procedimentos que são descritos a seguir são todavia aplicáveis. Pahl distingue entre as fases:

- *Clarificação da tarefa de projeto*: formalização de especificações
- *Projeto conceitual*: proposição de uma solução de princípio
- *Projeto de corporificação ou estrutural*: determinação de layout global
- *Projeto detalhado*: especificação de geometria

Nesse caso, a seleção em catálogo, que foi identificada por Ullman como uma tarefa separada, aqui é realizada em todas as quatro fases.

³ ROTH, K. (1982). *Konstruieren mit konstruktionskatalogen. Systematisierung und zweckmassige aufbereitung technischen sachverhalte fur das methodische konstruieren*, Springer Verlag, Berlin.

⁴ RODENACKER, W. (1971). *Methodisches Konstruieren*, Springer Verlag, Berlin.

⁵ PAHL, G.; BEITZ, W. (1984). *Engineering Design, a Systematic Approach*, Springer Verlag.

A **clarificação da tarefa de projeto** é uma elaboração (usualmente enxuta) da formulação do problema. Nessa fase, também as restrições dependentes do problema impostas por padronização, lei, regulamentos de segurança, etc., são determinadas.

A tarefa de **projeto conceitual**, como a determinação de soluções de princípio, consiste de (SCHMEKEL, 1989⁶ *apud* HOUTEN, 1991):

- A classificação de funções em sub-funções;
- A procura por soluções para sub-funções;
- A combinação de sub-soluções;
- A seleção das combinações mais apropriadas como variantes de conceito;
- A avaliação técnica e econômica das variantes de conceito.

Sub-funções, efeitos físicos, princípios físicos e princípios de solução podem ser classificados e estruturas de função podem subseqüentemente ser mapeadas em estruturas de soluções (FIGURA 4). Os resultados desse processo de mapeamento podem ser gravados em catálogos de projeto.

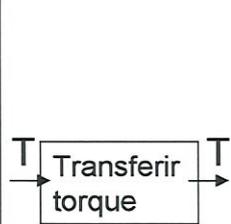
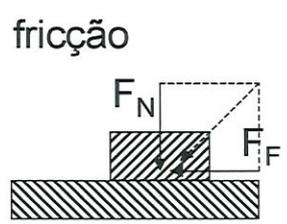
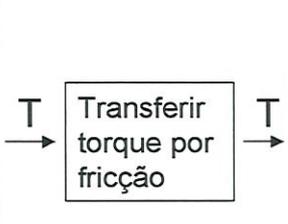
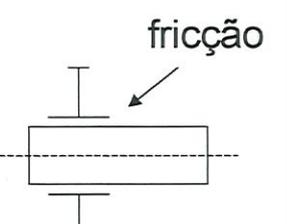
Sub-função	Efeito físico (independente da solução)	Princípio físico (sub-função + efeito físico)	Princípio de solução (princípio físico + <i>features de forma de projeto</i>)
	<p>fricção</p>  $F_F = \mu * F_N$	 $F_T = \mu * F_N$	

FIGURA 4: As inter-relações entre sub-função, efeito físico, princípio físico e princípio de solução (PAHL, 1984 *apud* HOUTEN, 1991)

O uso do critério de classificação e catálogos de projeto reflete uma formalização do modo tradicional que projetistas estão acostumados a manipular conhecimento conceitual.

Para as várias classes de problemas haverá uma diferença considerável em onde é dada maior ênfase quando se elabora a estrutura de função. Em projetos originais o estabelecimento da estrutura de função é a parte mais difícil, enquanto que projetos adaptativos precisam de menores modificações da estrutura de função, apenas adaptações para a correspondente modificação do princípio de solução. Projetos variantes têm uma estrutura de função e princípio de solução fixos, e não precisam de uma fase conceitual.

A tarefa de **projeto de corporificação**, ou seja, a determinação do layout global, compreende o mapeamento de princípios de solução físicos em estruturas de soluções técnicas. Elementos de construção genéricos, formas e features de forma são estabelecidos ou derivados de catálogos. Usualmente vários layouts diferentes são gerados e comparados. Aspectos positivos de variantes diferentes devem ser combinados no layout final.

Durante o processo de **projeto detalhado** a forma final, dimensões e propriedades (de superfícies) são estabelecidas e gravadas em um formato padrão. Aspectos funcionais como força, rigidez, peso, centro de gravidade, momentos de inércia, ajustes e limites, etc., são levados em conta na determinação das dimensões reais. Peças padrão são selecionadas de catálogos e formas projetadas novamente têm que ser adaptadas a elas. Os conflitos que aparecerem nesse estágio devem forçar “loops” de volta para fases anteriores de projeto. Esses conflitos são geralmente induzidos por problemas de manufatura e montagem (HOUTEN, 1991).

2.4 Projeto Assistido por Computador (CAD)

Neste capítulo é primeiramente apresentada uma revisão sobre o uso de computadores no processo de projeto, descrevendo os sistemas CAD como um auxílio ao projeto em geral, tanto às tarefas do projeto como às fases do projeto sistemático, e depois como auxílio especificamente à fase de projeto detalhado.

2.4.1 CAD como auxílio às tarefas de projeto

A produção e a manufatura sempre foram as grandes impulsionadoras da revolução de sistemas computacionais incluindo o desenvolvimento de sistemas CAD. Segundo Fenner (1984): “o CAD cresceu das necessidades das indústrias automotivas e aeroespaciais nos

⁶ SCHMEKEL, H. (1989). *A system for conceptual design of mechanical products*. Lic. Thesis,

anos cinquenta” (PUGH, 1991). Os sistemas CAD sempre deram maior atenção à elaboração de desenhos geométricos digitais, que podem ser armazenados eletronicamente. Atualmente, sua importância vem crescendo ainda mais com a informatização e digitalização das empresas.

Projeto assistido por computador (CAD) é um software que suporta as atividades do processo de projeto (ULLMAN, 1992), e não necessariamente apenas a fase de projeto detalhado. Há muitos tipos diferentes de ferramentas computacionais que auxiliam o projeto, cada tipo tem capacidades e limitações a respeito de certas fases ou técnicas no processo. Segundo ULLMAN (1992), essas ferramentas dividem-se em quatro tipos principais:

- **Ferramentas para análise de fins gerais:** são como “processadores de texto” matemáticos. São independentes-do-domínio e permitem a avaliação de qualquer coisa que possa ser modelada em termos de equações simples. Ex: planilhas, solucionadores de equações, ferramentas de projeto paramétrico/variacional;
- **Ferramentas para análise de fins específicos:** podem ser aplicadas apenas para um campo específico ou para um pequeno grupo de campos. Ex: ferramentas de análise de esforços e tensões, de análise cinemática e dinâmica, de análise térmica e fluidica, e de eletromagnética;
- **Ferramentas para desenho e visualização:** ferramentas geométricas para visualizar e comunicar geometria complexa. Ex: sistemas paramétricos, “CADrafting” (modeladores geométricos), “Rendering Systems” (sistemas gráficos de interpretação);
- **Sistemas especialistas:** têm como meta dar a um novato acesso ao conhecimento de especialistas. Esse conhecimento é representado em termos de regras. Os sistemas paramétricos e variacionais também fazem parte. Um exemplo de um sistema especialista diariamente em uso como auxílio ao projeto é o XCON (eXpert system CONfiguration), usado pela Digital Equipment Corporation (DEC) para ajudar a configurar montagens de computadores VAX e PDP-11.

Sistemas especialistas têm sido aplicados com sucesso no projeto de configuração, projeto de seleção, estimativa de custo, e planejamento de projetos. Infelizmente problemas de projeto que requerem maior originalidade provaram ser muito complexos para sistemas especialistas (ULLMAN, 1992).

2.4.2 CAD como auxílio às fases do projeto sistemático

Para se ter uma melhor visão por processo, será discutido o uso de computadores e a automação nas quatro fases do projeto sistemático visto no item 2.3.4.

A fase de clarificação da tarefa de projeto não pode ser automatizada. Envolve comunicação e raciocínio em linguagem natural e conhecimento implícito sobre um domínio muito maior que apenas o domínio do problema. Entretanto, bibliotecas eletrônicas com as restrições dependentes do problema (padronizações, leis, regulamentos de segurança, etc.) podem suportar o processo como fontes de informação para apoiar algumas decisões.

Na fase conceitual, a profundidade e escopo do conhecimento do domínio requerido dependem do tipo de projeto. No projeto *original*, onde novas estruturas de função ou novas configurações de (sub-) funções (ver FIGURA 4) têm de ser desenvolvidas e princípios de solução existentes não podem ser aplicados, programas de computador que estimulam a criatividade dos projetistas gerando associações devem ser úteis. Em projeto *adaptativo*, onde são feitas menores modificações nas estruturas de função existentes, podem ser usados catálogos (de solução) de projeto baseados em computador. Recentemente ainda há muito pouca ferramenta de suporte por computador disponível para projeto conceitual. Poucas atividades já podem contar com sistemas comerciais, como por exemplo a análise cinemática de mecanismos, com o sistema *Cognition*. Deve-se lembrar que essa fase é muito crítica para o projeto e requer uma visão multidisciplinar das conseqüências das decisões tomadas.

No estágio de projeto de corporificação, o suporte computacional está rapidamente se tornando disponível. Alguns sistemas são capazes de raciocinar sobre objetos genéricos satisfazendo restrições de projeto, como os sistemas *ICAD* e *Wisdom* (HOUTEN, 1991).

O projeto baseado em features também já conta com alguns sistemas comerciais. O uso de features no projeto *conceitual* e *estrutural* pode ser distinguido de acordo com Von Rimscha como o enfoque “*à priori*” do projeto baseado em features, e o uso no projeto *detalhado* ou *paramétrico* como o enfoque “*à posteriori*” do projeto baseado em features. Alguns sistemas comerciais têm algumas propriedades interessantes, mas os maiores avanços vieram da comunidade acadêmica. O *GEKO/KALEIT*, *DICAD* e *IIICAD* são sistemas *à priori* e ainda estão bem pouco maduros.

A seguir são brevemente descritos os *GEKO/KALEIT*, *DICAD* e *IIICAD*: sistemas *à priori*.

GEKO: Sistema de suporte a projeto de engenharia mecânica desenvolvido na Universidade Técnica de Berlin sob professor W. Beitz. Suporta um modelo de produto integrado. É um módulo do sistema *KALEIT*, que suporta o processo inteiro de projeto.

GEKO suporta as fases de projeto de incorporação e detalhado de acordo com princípios prescritivos. O modelo de solução de princípio (requisitos, estrutura de função, princípio de trabalho) é entrada para o sistema. O princípio de trabalho é subdividido em módulos (componentes) e funções são atribuídas a esses módulos. É baseado no modelador CATIA. Features são usados nas funções de modelagem.

DICAD: Sistema CAD Inteligente orientado a Diálogo. Está sendo desenvolvido na Universidade de Karlsruhe sob supervisão do Professor H. Grabowski. O central é o tão chamado modelo de produto integrado em que informações funcionais, estruturais e geométricas são integradas.

IICAD: Sistema CAD Interativo Integrado, Inteligente, sob desenvolvimento no Centro para Ciências Matemáticas e de Computação (CWI) em Amsterdã. O conceito central é a separação entre conhecimento de objeto e conhecimento de processo. É usado um meta-modelo, que é um modelo central de projeto do qual modelos de aplicação podem ser inferidos. A arquitetura do IICAD consiste em um mecanismo para descrever o meta-modelo, um para descrever o conhecimento do processo de projeto, um para traduzir meta-modelos em modelos de aplicação, um para avaliar projetos, e um supervisor que controla o processo de solução de problema. O IICAD emprega a linguagem ADDL (Artifact Design Description Language) para descrever o conhecimento de projeto e garantir consistência da descrição de dados (SALOMONS, *et al.*, 1993).

A fase de **projeto detalhado** é a área de maior aplicação da atual geração dos sistemas CAD comerciais. Possibilitam criar modelos 2D ou 3D pela manipulação interativa de primitivas como linhas, círculos, *splines*, superfícies e volumes. A maioria dos sistemas pode interfacear com outros sistemas como de análise por Método dos Elementos Finitos (FEM). Entretanto, segundo HOUTEN (1991), com respeito ao suporte ao projeto detalhado os sistemas CAD tradicionais estão ainda indo na direção errada. Forma é a entrada das ferramentas de análise em vez da saída. Como consequência devem ser feitos “*loops*”, consumindo muito tempo, de iterações de modificações na forma e análise subsequente.

Com relação ao projeto baseado em features, o *ASU Features Testbed* é um dos mais maduros sistemas *à posteriori*, e é brevemente descrito a seguir.

ASU Features Testbed: Esse sistema é uma coleção de módulos para o projeto, documentação, e avaliação de peças mecânicas desenvolvido na Universidade do Estado do Arizona (ASU) sob a supervisão do professor J.J. Shah.

O Testbed é organizado em dois *shells*; um para projeto, e um para mapeamento e aplicações.

Shell de projeto: Permite as opções de criação, adição, deleção, e modificação de feature. Suporta amostras de features e features compostos. Features de material e de precisão podem ser anexados aos features de forma para capturar informação de material, tolerância e geometria em um modelo. Regras, conhecimento ou restrições podem ser anexados aos features. Há possibilidades para projeto baseado em features, reconhecimento automático de feature e definição interativa de feature. Tolerâncias suportadas dentro do modelador podem ser definidas pelo usuário. São suportados padrões de tolerância ANSI Y14.5.

Shell de Mapeamento: O *Shell* de mapeamento e aplicação mapeia o modelo, que é descrito em termos de features de forma de projeto, para um modelo de feature de forma de aplicação. Aplicações são codificação em tecnologia de grupo, planejamento do processo, e avaliação de manufaturabilidade, e mapeamento para o STEP FFIM (SALOMONS *et al.*, 1993).

É de utilidade uma breve discussão da importância dos sistemas CAD. Alguns sistemas permitem ao usuário armazenar bibliotecas de projetos que podem ser chamados de volta e modificados para uso em outro lugar, o que pode melhorar a produtividade do projeto, além de contribuir para a Engenharia Simultânea. Segundo NOLEN (1989), o CAD elimina o esforço de desenhar como sendo o item de maior *lead time* no desenvolvimento de novo produto.

É bom ressaltar que em um ambiente não controlado, o CAD pode agravar a proliferação de projetos devido a sua velocidade de operação (NOLEN, 1989), e a variação de dimensões e tolerâncias, principalmente se não tiver uma integração com o planejamento de processo. Ver WANDECK (1994).

Os retornos e benefícios após a implementação de sistemas CAD ainda foram pouco pesquisados formalmente. Algumas pesquisas envolvendo várias variantes podem ser encontradas em PLONSKY (1991), mostrando os pontos fortes e fracos. Segundo NOLEN (1989) p.79, um estudo feito nos EUA mostra que, dentro de dois anos após instalação, a produtividade aumentou de duas a quatro vezes. Em aplicações mecânicas duas vezes mais, e em eletrônica quatro.

2.4.3 Modelagem em CAD na fase do projeto detalhado

A primeira descrição formal de projeto foi o rascunho, acompanhado de texto explicando as intenções do projetista e detalhes da construção. O rascunho foi sucedido pelo desenho técnico, submetido a um protocolo muito mais formal. Projetos mecânicos eram

representados por grupos de vistas 2D em que era possível um dimensionamento não-ambíguo. Em 1975 os primeiros sistemas CAD 3D tornaram-se operacionais.

Há alguns tipos de modelagem CAD no projeto detalhado, entre eles, categorizados como modelagem não-sólida ou que permite ambigüidade de interpretação, a modelagem Wireframe ou em arame e a modelagem em superfície, e como modelagem sólida não permitindo ambigüidade, a Geometria Sólida Construtiva (CSG) e a Representação por Fronteira (B-rep).

2.4.3.1 Modelagem não-sólida

Esse tipo de modelagem permite ambigüidade na visualização (HOUTEN, 1991) e não completude da representação, por isso não é considerado um modelo sólido (CHANG & WYSK, 1985). Como formas de modelagem não-sólida têm-se a modelagem em arame e a modelagem em superfície, que são descritas a seguir.

2.4.3.1.1 Modelagem wireframe (em arame)

Esse tipo de modelagem 3D permitiu a criação de modelos espaciais e garantiu a consistência das vistas 2D e seu dimensionamento. O modelo não contém informação sobre a forma de suas superfícies, permitindo ambigüidade na visualização (HOUTEN, 1991) e não completude da representação, não sendo então considerado modelo sólido (CHANG & WYSK, 1985). Como o nome implica, consiste de pontos e linhas [curvas, círculos, etc. (CHANG & WYSK, 1985)] tridimensionais que identificam o perímetro (NOLEN, 1989).

2.4.3.1.2 Modelagem em superfície

Possibilitou a definição e análise de formas complexas sem se precisar criar um modelo físico (HOUTEN, 1991), e é o melhor e possivelmente o único jeito para representar superfícies de forma livre (KIRITSIS, 1995). Os sistemas CAD baseados em superfície podem representar vários tipos de superfícies como forma chata, analítica, varrida e livre. As últimas são modeladas por algoritmos baseados no trabalho de Bezier ou de Boor (B-splines). A maioria dos sistemas CAD baseia-se em Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) (HOUTEN, 1991). Os tipos de modelos podem ser: Bezier, B-spline, NURBS, Beta-spline, Ferguson, etc. (KIRITSIS, 1995). Curvas e superfícies são aproximadas por funções de parâmetros que podem ser manipuladas movendo os pontos de controle. Pedacos de superfície podem ser casados e compostos em um modelo completo de superfície. A representação em superfície descreve um objeto mais em detalhes que a em arame, mas

ainda não contém informação suficiente para não possibilitar ambigüidade (HOUTEN, 1991).

2.4.3.2 Modelagem sólida

A modelagem sólida oferece vantagens sobre as duas anteriores: descrição geométrica não-ambígua; possibilidade para checagens de interferência; jeito mais natural de criar modelos por operações lógicas em objetos sólidos primitivos; geração de imagens (sombreadas) consistentes dos modelos; a computação de áreas de superfície e propriedades volumétricas (volume, peso, etc.); geração automática de malhas para análise FEM; possibilidade de uso dos dados do modelo para geração automática de dados CN.

Em 1973 foram desenvolvidos dois diferentes conceitos para modelagem sólida, ambos usando sólidos primitivos, transformações e operações booleanas para criar sólidos mais complexos, mas a representação interna do modelo era completamente diferente. No sistema TIPS (OKINO, 1973⁷ *apud* HOUTEN, 1991) a descrição de sólidos primitivos, transformações e operações constituíam o modelo. No sistema BUILD (BRAID, 1973⁸ *apud* HOUTEN, 1991) o modelo consistia do grupo de faces do sólido junto com a informação topológica em como suas faces, arestas e vértices são conectados. A representação do TIPS é atualmente chamada de Geometria Sólida Construtiva (CSG), e a do BUILD é chamada de representação de Fronteira (B-rep). A maioria dos sistemas usa ou CSG, ou B-rep, ou ambos. Ambos métodos de modelagem sólida têm suas vantagens e desvantagens (HOUTEN, 1991).

2.4.3.2.1 Geometria Sólida Construtiva (CSG)

Em CSG, um objeto é construído aplicando-se operadores booleanos em formas primitivas usadas como blocos de construção (CHANG & WYSK, 1985). Assim, um modelo CSG é uma árvore binária constituída de objetos primitivos e operadores booleanos. As folhas da árvore representam as primitivas e os nós os objetos mais complexos. A raiz da árvore representa o produto completo (HOUTEN, 1991). Primitivas são ou sólidos [prismas retangulares, esferas, cilindros, cones, etc. (COMPUTER aided design, 1998)], ou meio-espaços [superfície infinita que divide o espaço 3D em uma região sólida e uma região vazia (HOUTEN, 1991)] pré-definidos ou criados pelo usuário (KIRITSIS, 1995). Cada primitiva é associada com uma transformação 3D que especifica sua posição, orientação e dimensões.

⁷ OKINO, N.; NAKAZU, Y.; KUBO (1973). TIPS-1: technical information processing system for computer aided design, drawing and manufacturing, in computer languages for numerical control, J. Hatvany, Ed., North Holland, Amsterdam 141-150.

⁸ BRAID, I.C.; LANG, C.A. (1973). Computer aided design of mechanical components with volume building bricks, in computer languages for numerical control. J. Hatvani, Ed. North Holland 173-184.

Os operadores usualmente aplicados são união, intersecção e diferença. A especificação da estrutura de ajuste é feita através de entrada em texto ou via ícones ou menus com objetos (primitivos) e operações. Pode-se mudar o modelo ou alterando os parâmetros das primitivas ou adicionando e removendo galhos (HOUTEN, 1991). Geralmente não é possível modificar o modelo localmente interativamente porque não há informações explícitas disponíveis de faces, arestas e vértices (HOUTEN, 1991; KIRITSIS, 1995). Se há uma mudança no projeto, o modelo terá que ser reconstruído, devido à falta de capacidade de editar e redimensionar (COMPUTER aided design, 1998).

As vantagens do CSG sobre o B-rep são: tem uma estrutura de dados simples e pequena onde é mais fácil gerenciar; sempre corresponde a um sólido fisicamente válido; um sistema usando CSG usualmente possui a facilidade de gerar B-reps e assim podem suportar grande variedade de aplicações; como o CSG define o processo de modelagem e não a forma do modelo, pode-se facilmente e rapidamente modificar o modelo simplesmente mudando as operações, as transformações ou as primitivas (HOUTEN, 1991).

2.4.3.2.2 Representação por Fronteira (B-rep)

Essa técnica é baseada nas técnicas de modelagem de superfície para formas 3D (HOUTEN, 1991). Em B-rep, objetos são representados por suas faces de fronteira. Faces são quebradas e representadas por arestas e vértices (CHANG & WYSK, 1985). A primeira geração desses modeladores representava objetos sólidos ou apenas tabelas de faces, arestas e vértices, com as primeiras armazenando informações sobre todas as arestas anexadas às faces (a ordem das arestas determinava qual lado representava o lado de fora do sólido), as de arestas armazenando dois vértices para cada aresta, e as tabelas de vértices armazenando as coordenadas de cada vértice. Nos primeiros sistemas as informações topológicas contidas nas tabelas eram difíceis de acessar (HOUTEN, 1991), depois foram sendo criadas representações que também possibilitavam esse tipo de informação.

A modelagem B-rep começa com um ou mais perfis em arame, e criam um modelo sólido por extrusão, varredura, revolução, ou pelação desses perfis. As operações booleanas também podem ser usadas nos perfis e nos sólidos gerados por eles. Sólidos também podem ser criados combinando superfícies que geralmente têm formas complexas através de uma operação de “costura” (por exemplo corpo de um avião) (COMPUTER aided design, 1998), como se tivesse colocando uma “pele” numa armação.

Os métodos CSG e B-rep geralmente podem ser combinados. Cada um tem suas limitações, e peças que são difíceis de criar apenas com um ou outro método podem ser mais

facilmente criadas usando uma combinação de ambos. A maioria dos sistemas comerciais é híbrida (COMPUTER aided design, 1998).

2.5 Modelagem baseada em *feature*

A modelagem baseada em *feature* está se tornando rapidamente o método de modelagem preferido dos engenheiros mecânicos (COMPUTER aided design, 1998). Além disso, o seu papel no processo de projeto e desenvolvimento de produto, juntamente com o conceito de *features*, está adquirindo grande importância. Também, pelo seu grande papel na viabilização da integração CAD-CAPP procurando a automação de todo o processo que compreende desde o final do projeto detalhado até o planejamento de processo, a modelagem baseada em *feature* é apresentada neste capítulo.

2.5.1 Introdução

Este sub-capítulo (item 2.5) trata da tecnologia de *features* e do projeto baseado em *features* como meios para comunicar e interfacear conhecimento em projeto com planejamento de processo em um formato computacional (ou não, se for para integrar apenas processos e não sistemas) a fim de facilitar e otimizar a interpretação automática da representação da peça por um CAPP automático.

Features podem ser vistos como grupos de informação relacionados a aspectos de forma ou outros atributos de uma peça, sendo que podem ser usados na racionalização sobre projeto, desempenho ou processamento de uma peça em máquina-ferramenta ou montagens que elas constituem. Por isso, a tecnologia de *features* é esperada como sendo capaz de prover um melhor enfoque para integrar o projeto e aplicações seguintes, como análise de engenharia, planejamento do processo, manufatura, e inspeção (FIGURA 5).

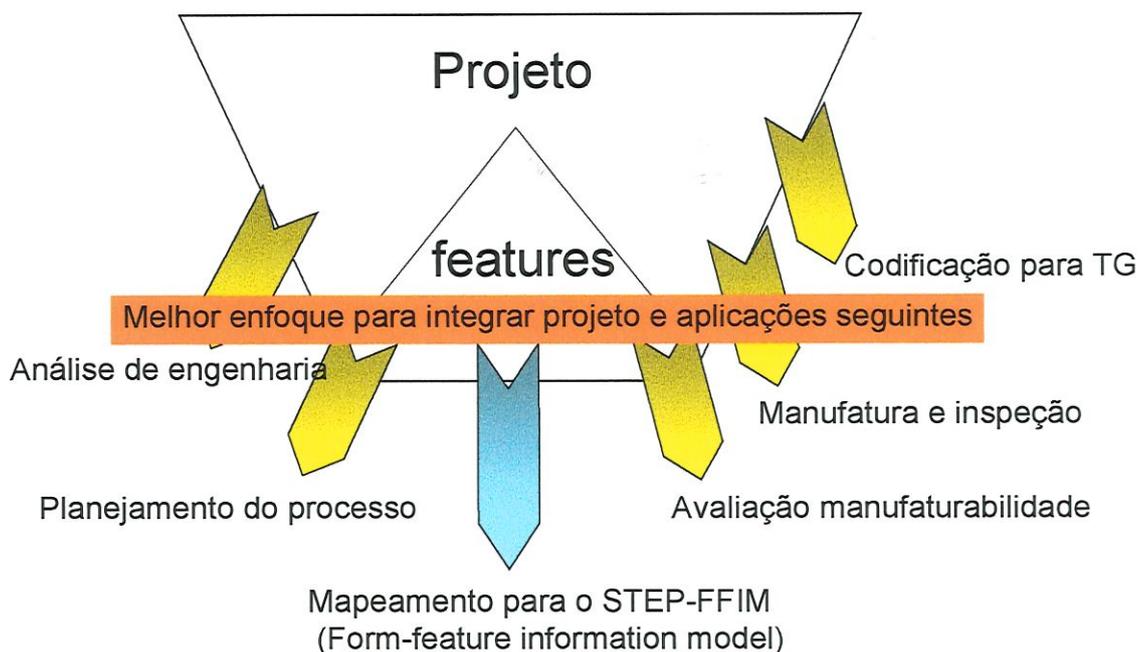


FIGURA 5: Fatures e o projeto baseado em feature - importância

Este capítulo discorre sobre as definições de features, necessárias para um melhor entendimento desta tecnologia, depois apresenta os métodos disponíveis correntemente para se obter os features de aplicação (como os de manufatura e de análise e inspeção), e por último o projeto baseado em features, onde é contextualizado dentro do processo de projeto para uma melhor naturalidade da técnica e para apresentar uma visão por processo. A referência base foi SALOMONS *et al.* (1993), visto que oferece uma revisão bem completa sobre o assunto, e ao longo dos tópicos o texto foi enriquecido com argumentos de outras referências.

2.5.2 Definições de features

Não há uma definição de features universalmente aceita. De fato, isso tem sido uma das dificuldades que os pesquisadores encontraram nessa área (JI & MAREFAT, 1997). Cada sistema utiliza a sua própria definição, dificultando a integração com outros sistemas como o CAPP. O padrão STEP veio com a intenção de amenizar esse problema (ROZENFELD, 1992).

As primeiras definições foram features de forma orientados a planejamento de processo, como a definição de *feature de blank*: uma configuração geométrica específica

formada na superfície, aresta ou canto de um blank (*CAM-I's Illustrated Glossary of Workpiece Form Features*, 1981⁹ *apud* SALOMONS *et al.*, 1993).

Uma definição mais recente de feature de forma relacionado a planejamento de processo: uma parte distintiva ou característica de um blank, definindo uma forma geométrica, que ou é específica para um processamento em máquina-ferramenta ou pode ser usada para fixação e/ou propósitos de medição (VAN T'ERVE, 1988¹⁰ *apud* SALOMONS *et al.*, 1993).

Outra definição mais recente, que pode também ser aplicada em outros domínios, é a de *feature de forma* por Wingard: uma forma genérica que carrega algum significado de engenharia (WINGARD, 1991¹¹ *apud* SALOMONS *et al.*, 1993). A FIGURA 6 seguinte ilustra as primeiras definições.

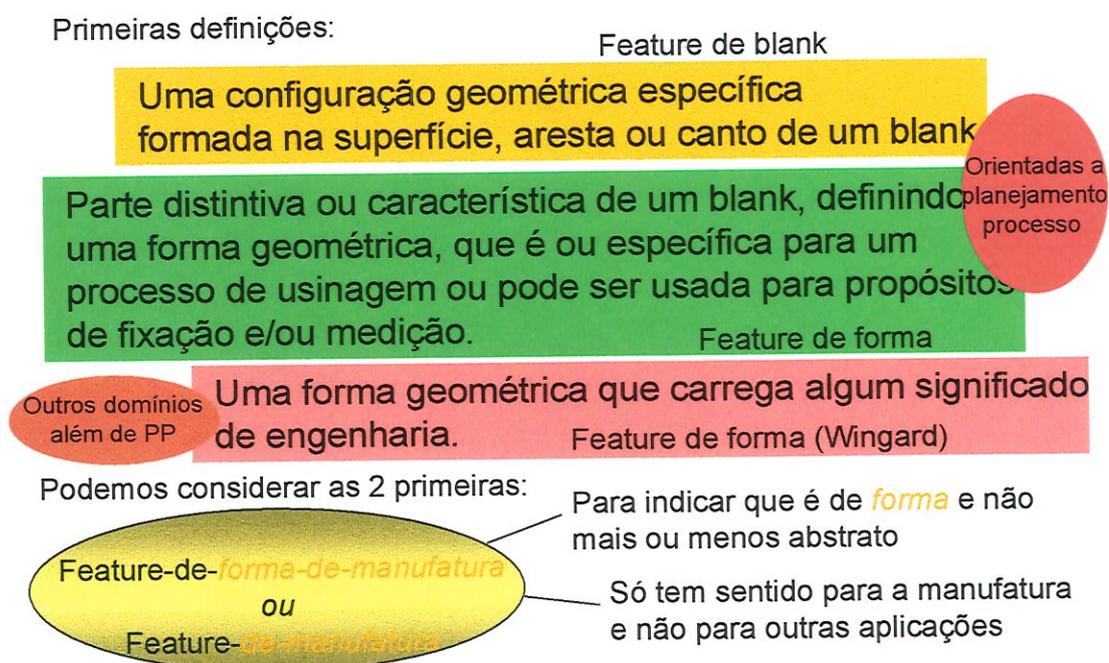


FIGURA 6: Algumas definições de feature

Muita confusão caiu sobre as definições de features assim que se tornaram relevantes a outras aplicações como projeto e análise de engenharia, e porque features não necessariamente se relacionam a forma. Nesta revisão podemos considerar as duas primeiras definições acima como *features de forma de manufatura* (ou simplesmente *features de*

⁹ (1981) *CAM-I's Illustrated glossary of workpiece form features*, R-80-PPP-02.1.

¹⁰ VAN T'ERVE, A.H. (1988). *Computer aided process planning for part manufacturing, an expert system approach*. PhD Thesis, University of Twente, Enschede.

¹¹ WINGARD, L. (1991). *Introducing form features in product models, a step towards CAD/CAM with engineering terminology*. Licenciante Thesis. Department of Manufacturing Systems, Royal Institute of Technology, Stockholm.

manufatura), e não features em geral. Primeiro para indicar que são features de forma e não “mais ou menos” features abstratos; segundo porque são relacionados a processos de manufatura; eles apenas têm significado para manufatura, e não necessariamente para outras aplicações.

Como a tecnologia de feature espalhou-se do planejamento de processo para projeto, inspeção e análise de engenharia, as definições tenderam a se tornar mais gerais, como alguns exemplos (SALOMONS *et al.*, 1993):

- Moldes repetitivos de informação relacionados a uma descrição de peça;
- Qualquer entidade usada na racionalização de projeto, engenharia e manufatura;
- Um agrupamento semântico usado para descrever uma peça e sua montagem. Agrupa de uma maneira relevante informação funcional, de projeto e manufatura;
- Uma região de interesse;
- Formas genéricas ou outras características de uma peça com as quais engenheiros podem associar conhecimento útil para racionalização da peça (HAN & ROSEN, 1998);
- Agrupamentos de entidades topológicas de um componente que são semanticamente significantes na sua produção e assim precisam ser referenciados juntos (JI & MAREFAT, 1997).

A título de ilustração, deve-se lembrar que os features podem ser definidos de diferentes pontos de vista, por exemplo *features de projeto* são as formas relacionadas a uma função da peça, sua intenção de projeto, ou a metodologia de construção do modelo (canal para óleo). *Features de manufatura* são as formas associadas com operações de máquina distintas (furos, rasgos de chaveta, etc.) (LEE & KIM, 1999). *Features geométricos* são as formas relacionadas puramente a características geométricas (esferas, cilindros, etc.).

Muitos outros tipos de features foram propostos: *features funcionais*, *features de montagem*, “*mating features*” (features de associação, união, encaixe), *features físicos*, e até *features abstratos*. Features abstratos podem ser usados durante o processo de projeto, pois muitos features não serão conhecidos em detalhes antes do fim do processo. Sua definição: Entidades que não podem ser avaliadas ou fisicamente realizadas até que todas as variáveis tenham sido especificadas ou derivadas do modelo (SALOMONS *et al.*, 1993).

Finalmente, o que se deve ter por garantido é que features estão juntos a alguma forma geométrica. SHAH (1990)¹² *apud* SALOMONS *et al.* (1993) define os requisitos mínimos aos quais um feature deveria satisfazer: um constituinte físico de uma peça; ser mapeável a uma forma genérica; ter significado de engenharia; e ter propriedades predizíveis.

2.5.3 Formas de se estabelecer features

Anteriormente (atualmente também) a integração entre o CAD e o CAPP consistia (ou ainda consiste) num processo de interpretação manual da peça pelo engenheiro e sua interação com o CAPP. Para quebrar essa barreira existente entre o CAD e o CAPP e integrar todo o processo automaticamente por computador, muitos esforços têm sido feitos, e todos usando o conceito de features, uma vez que por terem significado em engenharia o CAPP automático pode utilizá-los como entrada para derivar seus resultados de planejamento de processo (JI & MAREFAT, 1997). Para a obtenção desses features, três visões principais têm sido percebidas, que podem ser consideradas como os métodos disponíveis atualmente para se obter os features de aplicação:

- Incorporar features no modelo durante o processo de projeto (**projeto baseado em feature**) (JI & MAREFAT, 1997; PRABHU & PANDE, 1999; LEE & KIM, 1999; SCHULZ & SCHÜTZER, 1993; SALOMONS *et al.*, 1993; HOUTEN, 1991);
- Reconhecer features do modelo automaticamente ou interativamente (**reconhecimento de feature**) (JI & MAREFAT, 1997; PRABHU & PANDE, 1999; LEE & KIM, 1999; SCHULZ & SCHÜTZER, 1993; SALOMONS *et al.*, 1993; HOUTEN, 1991);
- Definir features por assistência humana ou interativamente (**definição interativa de feature**) (JI & MAREFAT, 1997; SALOMONS *et al.*, 1993; HOUTEN, 1991).

No momento prevalecem as duas primeiras visões. Vários autores advogam que os futuros sistemas CAD/CAPP deveriam prover ambas as primeiras, visto que apenas uma delas não satisfaz os requisitos da integração. Outro autor ainda defende que todos os três

¹² SHAH, J.J. (1990). Philosophical Development of form feature concept. *CAM-I Report P-90-PM-02*.

enfoques deveriam ser integrados em um unificado. Uma primeira tentativa foi implementada no sistema *ASU Features Testbed* (descrito no item 2.4.2).

Esses enfoques híbridos têm sido empregados junto com questões como validação de feature, integração feature-processo-função para engenharia concorrente, modelagem baseada em restrição (paramétrica), etc. Pesquisa também está focada no desenvolvimento de esquemas de representação de produto baseada em feature usando padrões como PDES, STEP, CALS, etc. Tudo usando modelagem sólida como tecnologia *core* (PRABHU & PANDE, 1999).

O projeto baseado em feature é apresentado a seguir. O reconhecimento de feature e a definição interativa de feature estão mais ligados ao planejamento de processo, ou aos deveres dos sistemas CAPP automáticos e integrados, e não ao projeto, e por isso são apresentados respectivamente nos itens 2.8.1 e 2.8.2.

2.5.4 O projeto baseado em feature

No *projeto baseado em feature*, ou também *projeto por features*, ou *modelagem baseada em feature*, um modelo de produto pode ser construído usando features (SALOMONS *et al.*, 1993).

Essa técnica é baseada na idéia de projetar com “blocos de construção” ou primitivas de mais alto nível que são mais relevantes para a aplicação específica, ao invés de utilizar formas analíticas como caixas, cilindros, esferas e cones como primitivas. Esse enfoque deve tornar os sistemas de modelagem sólida mais fáceis de usar. Entretanto, o grupo fixo de features que é oferecido pela geração presente de modeladores baseados em feature é muito limitado para o uso industrial (HOUTEN, 1991).

O enfoque da modelagem baseada em feature quando se utilizam sistemas computacionais exige praticamente que se trabalhe com geometria variacional ou paramétrica, assim a modelagem baseada em feature trabalha com a modelagem paramétrica. Mas se pode trabalhar com a modelagem paramétrica (ou baseada em restrições) sem ser baseada em feature, o que praticamente não ocorre nos sistemas comerciais. A modelagem paramétrica é descrita a seguir.

2.5.4.1 Modelagem paramétrica

A modelagem paramétrica associa *parâmetros* a cada entidade, como primitivas booleanas, linhas ou arcos em arame, operações, dimensões, etc. Esses parâmetros controlam as várias propriedades geométricas da entidade, como por exemplo o comprimento, largura e

altura de um prisma retangular, ou o raio de um *fillet*. Também controlam os locais dessas entidades dentro do modelo. Esses parâmetros podem ser mudados pelo operador quando necessário para criar a peça.

Os modeladores paramétricos utilizam um método baseado em história para manter uma gravação de como o modelo foi construído. Quando o operador muda os valores dos parâmetros no modelo e regenera uma peça, o programa repete as operações da história, usando os novos valores para criar o novo sólido. Há muitos usos para esses tipos de modelagem incluindo teste de vários tamanhos de peças para determinar qual é a melhor peça simplesmente ajustando os valores dos parâmetros e regenerando a peça.

Alguns modeladores paramétricos também permitem equações de restrição a serem adicionadas aos modelos. Isso pode ser usado para construir relacionamentos entre parâmetros. Se vários parâmetros sempre requerem o mesmo valor, ou um valor de certo parâmetro depende dos valores de vários outros, isso é o melhor jeito para garantir que esses relacionamentos estejam sempre corretos.

Esses modeladores também permitem outros métodos de relacionar entidades. Entidades podem estar localizadas por exemplo na origem de curvas, no fim de linhas ou arcos, em vértices, ou nos *midpoints* (pontos localizados no meio das entidades) de linhas e faces. Também podem ser localizados a uma distância ou no fim de um vetor desses pontos. Quando o modelo é regenerado esses relacionamentos são mantidos. Alguns sistemas também permitem restrições geométricas entre entidades. Essas podem requerer que entidades sejam por exemplo paralelas, tangentes, ou perpendiculares.

A modelagem paramétrica é a mais eficiente quando se trabalha com projetos que sofrem mudanças dimensionais em vez de mudanças geométricas grosseiras (COMPUTER aided design, 1998). Pode ser muito produtivo em desenvolvimento e aprimoramento (otimização) de produtos uma vez que os desenhos de vários produtos semelhantes e com dimensões diferentes podem ser automaticamente elaborados para serem usados em vários outros fins.

O projeto baseado em feature é contextualizado a seguir dentro do processo de projeto para sua melhor localização e entendimento na visão por processos. O assunto está apresentado em mais detalhes nesta revisão pelo fato de desempenhar um grande papel na integração CAD-CAPP no caso de um escopo maior de peças.

2.5.5 O projeto baseado em feature no contexto do processo de projeto

A pesquisa em projeto baseado em feature encaixa-se quase que integralmente, entre os modelos do processo de projeto, no enfoque baseado em computador, estando até recentemente principalmente envolvida com o projeto detalhado ou paramétrico e só agora se envolvendo com o conceitual e o de configuração. O projeto baseado em feature e os sistemas para tal podem ser baseados em qualquer modelo do processo de projeto (prescritivos, descritivos, etc.).

Features não mostraram ser de bom uso na fases mais preliminares do projeto, onde são utilizadas as duas primeiras categorias de funções descritas no item 2.3.3, as *funções gerais* e as *funções especializadas*, que ainda são independentes do princípio de trabalho. Os features encaixam-se melhor na terceira categoria de função, as *funções dependentes do princípio de trabalho* por serem relacionados (os features) a um componente (peça). As funções dependentes do princípio de trabalho geralmente se materializam nos features que formam a interface com outros componentes. Não há um grupo extensivo de funções de baixo nível aos níveis de componente e de feature. Da prática, uma lista delas é identificada: *conter, carregar, converter, controlar, alojar, suportar, localizar, conduzir, guiar, limitar, vedar, prender, lubrificar, reforçar, ajustar-se a*.

Como mencionado no item 2.4.2, o uso de features no projeto *conceitual e estrutural* e o uso no projeto *detalhado* ou *paramétrico* podem ser distinguidos respectivamente de acordo com RIMSCHA (1990)¹³ *apud* SALOMONS *et al.*, (1993): o enfoque *à priori* e o enfoque *à posteriori* do projeto baseado em feature.

2.5.5.1 O enfoque *à priori*

O enfoque *à priori* do projeto baseado em feature (uso de features no projeto conceitual e estrutural) começa com noções mais abstratas para ser gradualmente enriquecido por informação geométrica e outras mais detalhadas. Assim satisfaz as necessidades de mais tarefas do projeto que as do (ou parte das do) projeto detalhado. Aqui são introduzidos os termos: *features abstratos*, “*mating features*”, *features funcionais* e *features de montagem*. Exceto para geometria e topologia, montagens e funções poderiam ser modeladas usando esses features. Mäntylä propôs a noção de projeto-pelos-mínimos-compromissos que poderia ser encapsulado dentro deste enfoque: Se a forma exata de uma

¹³ RIMSCHA, M. Von (1990). Feature modelling and assembly modelling – a unified approach. *Advanced geometric modelling for engineering applications*, edited by F.-L. Krause and H. Jansen, Elsevier, IFIP/GI, p. 203-13.

peça não é funcionalmente importante, o projetista não deveria fazer uma escolha arbitrária mas deixar não-especificado.

O **projeto conceitual** (como visto no item 2.3.4) é a etapa do projeto em que as funções gerais ou especializadas de alto nível do produto a ser projetado são determinadas assim como as soluções de princípio ou embasamentos físicos para satisfazer essas funções. Os sistemas DICAD e KALEIT possuem também funções de alto nível. As funções de alto nível não são geralmente relacionadas a features pois muitos dos componentes ainda não são conhecidos. Depois da noção de projetar com features no projeto detalhado, foi proposto recentemente o uso de *features físicos* no projeto conceitual, que são considerados como soluções de princípio.

Na etapa do **projeto de configuração** ou **estrutural** (como visto no item 2.3.4), um conceito físico é transformado em uma configuração com um grupo definido de atributos, mas sem valores particulares atribuídos. O uso de features nesta fase é relativamente novo, mas muitos autores já estão tratando desse assunto. Montagens e funções ao nível de componente podem ser modeladas utilizando os *features abstratos*, “*mating features*”, *features funcionais* e *features de montagem*. BAUERT (1990)¹⁴ *apud* SALOMONS *et al.*, (1993) recentemente advogou sobre o suporte aos projetistas com padrões e componentes padrões (como mancais) assim como tabelas de decisão e fórmulas em conjunção com features. Seu sistema (GEKO) está descrito em mais detalhes no item 2.4.2.

2.5.5.2 O enfoque à *posteriori*

Este enfoque é o mais usual no projeto baseado em features, e é relacionado a apenas as tarefas do projeto detalhado. Pode ser visto como projeto paramétrico. Têm sido usados os *features de forma*, *features de material*, e *features primitivos* ou *de precisão* para definir respectivamente a forma nominal, propriedades de material, e geometria variacional (tolerâncias) de peças individuais. Toda a documentação dessas informações pode ser obtida com este enfoque do projeto baseado em features.

Para se chegar à forma nominal dos componentes, trabalha-se com os features que têm uma forma pré-definida (*features de forma*), que são usualmente representados por CSG ou B-Rep. Seu conceito é largamente usado.

Os features de forma pretendem alcançar uma dada função ou modificar a aparência de uma peça. A desvantagem deste enfoque é que embora a intenção de projeto é mais bem

¹⁴ BAUERT, F. (1991). “Methodische produktmodellierung für den rechnerunterstützten entwurf,” Schriftenreihe konstruktionstechnik 18 W. Beitz, *PhD Thesis*, TU Berlin.

capturada que em modeladores sólidos convencionais, ela é difícil de se recorrer pois o significado de engenharia está implícito no feature.

Feature primitivo é uma entidade geométrica básica de uma peça como superfícies, arestas e vértices, ou atributos geométricos auxiliares como linhas de centro e planos de centro. Os features de forma são construídos em cima dos primitivos. E a estes se referem para se definir dimensões e tolerâncias, e para se especificar “*mating features*” na descrição de montagem.

No enfoque *à posteriori* pode-se modelar com features de forma de manufatura pré-definidos, ou com features de forma de projeto pré-definidos. Projetistas usualmente preferem a segunda opção. Usualmente se começa ou com um modelo geométrico mais ou menos completo e se define features de forma nele, ou se começa do princípio combinando features de forma de uma biblioteca padrão. Projetar com features de forma pré-definidos pode reduzir o número de comandos de entrada, o que é especialmente vantajoso em re-projeto. A representação paramétrica de features apresenta um jeito poderoso para se mudar dimensões de features.

2.5.5.3 Projeto Visando X (DFx) baseado em feature

A necessidade de não se considerar apenas função, adaptação, e forma de um objeto-projeto, mas também a manufaturabilidade, facilidade de montagem, de serviço, e até o ciclo de vida completo fez com que se falasse em Projeto para Manufatura (DFM), Projeto para Montagem (DFA), e em geral Projeto para X (tudo) ou projeto concorrente ou engenharia simultânea ou concorrente. Features podem também assistir esses processos mais específicos de projeto.

Alguns trabalhos nessa área foram feitos como feedback de informação de custo para projetistas na modelagem por features; um sistema em que projetos são desenvolvidos passo-a-passo junto com planos para manufaturá-los.

Na avaliação de manufaturabilidade pode-se deparar com duas classes de problemas: problemas de atributo de feature (tolerâncias críticas dentro de um feature), e problemas inter-feature (interações de feature e dimensões entre features de forma).

Assim que a modelagem baseada em feature com avaliação de manufaturabilidade para peças completas e incompletas suceda, é esperada uma mudança na tarefa de planejamento de processo tradicional.

2.5.5.4 O ponto de vista do projeto

Apesar de decisões em projeto também serem relacionadas a montagens, as primeiras referências aos features no projeto em engenharia mecânica foram relacionadas a peças individuais, provavelmente devido ao conceito de features trazido do planejamento do processo que tratam de peças individuais primeiramente. Por isso, uma verdadeira assistência por computador para os projetistas (considerando montagens, etc.) ainda não foi alcançada, apesar do aprimoramento da modelagem baseada em features para peças individuais. Agora essa situação já está mudando.

Do ponto de vista do projeto, o projeto baseado em feature tem o potencial de suportar o processo de projeto melhor que os sistemas CAD correntemente utilizados. Por várias razões: features são elementos significativos para projetistas e podem aumentar a velocidade do processo de projeto assim como prover meios de padronização, assim reduzindo custo e tempo-para-mercado. Também, aprimorar a qualidade do projeto e a ligação entre projeto e aplicações como planejamento e análise de processo são vantagens esperadas (SALOMONS *et al.*, 1993).

Mas atualmente o projeto por features ainda não alcançou as suas expectativas:

- Não há um número finito de features em projeto. O número limitado de features existentes nas bibliotecas dos sistemas CAD faz com que os projetistas tenham disponível um menor número de elementos significativos, diminuindo a qualidade do projeto.
- Problemas de gerenciamento de dados não são triviais, o que pode gerar inconsistências e erros, diminuindo a qualidade do projeto, além de problemas de padronização, que influenciam no custo, qualidade e tempo.
- Features são específicos a aplicação. Isso dificulta a necessidade para a pesquisa em reconhecimento automático de features. E também a ligação com outras aplicações.
- Não está claro se projetistas realmente projetam em termos de features ou se features resultam de outras considerações, ou seja, se a primeira coisa que vem na cabeça são os features, ou se pensam em outras coisas e depois transformam em features. Isso pode resultar em: features não serem mais elementos significativos para projetistas; velocidade do projeto ser um pouco menor; maior variedade de peças (menos padronização) aumentando custo e tempo com menos qualidade e dificultando a integração com outras aplicações como planejamento de processo.

Observa-se assim a necessidade e importância de se avançar e evoluir na pesquisa sobre esse tema.

2.5.5.5 O ponto de vista do planejamento de processo

O primeiro uso de features foi em CAPP, onde é necessário analisar a peça para gerar o plano de processo detalhado. Nessa análise, features (de manufatura) são a chave para gerar o plano de processo. Por duas razões:

- é uma forma natural de comunicação. Por exemplo, um feature rasgo de chaveta pode gerar a instrução “usinar rasgo de chaveta” no plano de processo.
- simplifica o planejamento do processo pois há um número finito de modos de manufaturá-la. Um feature rasgo de chaveta pode ser usinado numa fresadora, numa chaveteira, ou conformado numa prensa.

Essas duas razões auxiliam muito o CAPP automático. Neste, já é difícil criar resultados de planejamento de processo automaticamente a partir da peça já interpretada, ainda mais sem uma representação viável para o bom entendimento da peça pelo CAPP automático.

Algumas dificuldades de integração podem ser relatadas do ponto de vista do planejamento do processo: A automação do CAPP requer que dados do produto sejam extraídos automaticamente do modelo, e a representação em CAD geralmente difere do tipo de informação requerido pelo CAPP (features de manufatura). O reconhecimento de features significa inferir muita informação do modelo em CAD por alto custo enquanto que essa informação já foi gerada (ou deveria ter sido) durante o processo de projeto, mas não foi armazenada em um formato computacional e foi perdida uma vez que o resultado do projeto foi armazenado no CAD através de entidades geométricas no espaço.

O projeto baseado em features poderia (no mínimo parcialmente) ajudar a resolver esse problema.

2.6 Planejamento de processo

O processo de planejamento de processo vem adquirindo crescente importância no desenvolvimento de produto, uma vez que ainda tem grande potencial de ser otimizado e contribuir grandemente com os requisitos atuais do desenvolvimento de produto. A seguir é apresentada uma revisão sobre o planejamento de processo.

2.6.1 Processos de manufatura e o planejamento de processo

Desde que pessoas vêm fazendo coisas, vêm inventando mecanismos que as auxiliam a facilitar seu trabalho e aumentar a sua qualidade. Qualquer grupo de mecanismos projetados para ajudar pessoas na realização de discretos produtos físicos pode ser considerado como um sistema de manufatura. Sistemas de manufatura podem ser modelados como unidades funcionais, permitindo fluxo e transformação de material, energia e informação (HOUTEN, 1991).

O processo de manufatura (produção) não inclui somente os processos que agem diretamente sobre os objetos manufaturados, que trocam a forma, dimensões e propriedades da matéria-prima ou de produtos semi-acabados ou que montam peças em produtos, mas também processos preparatórios (como planejamento do processo, planejamento da produção, programação da produção, preparação de ferramental, etc.) e processos auxiliares (como manutenção de equipamentos, manipulação de material, afiação de ferramental, inspeção de qualidade, estatísticas de produção, contabilidade de custos, etc.).

Dentre os processos de manufatura que agem diretamente sobre os objetos manufaturados inclui-se fundição, forjamento, soldagem, usinagem, puncionamento, tratamento térmico, revestimento, etc.

Dentre os processos de usinagem inclui-se torneamento, fresamento, furação, retificação, mandrilamento, corte de engrenagens, etc., dependendo da forma, dimensões, acuracidade e qualidade superficial da peça (WANG & LI, p.3, 1991).

Esses processos são considerados como as sucessivas operações de remoção de material do blank (KANAI *et al.*, 1989). Representam aproximadamente 80% dos processos de transformação, podem ser usados em um grande espectro de aplicações e volumes de lote, e permitem considerar maior número de soluções na preparação do plano de processo, que serão restringidas considerando-se material, forma, capacidades de equipamento e volume do lote, a fim de se evitar problemas na programação da produção (HALEVI & WEILL, 1995; HOUTEN, 1991), além de tempos e custos. Portanto pode-se dar maior atenção a eles no planejamento do processo.

Depois de um novo produto ser projetado, o planejamento dos processos é o primeiro passo do trabalho preparatório para a manufatura, e serve como base e dado inicial para todos outros trabalhos preparatórios, e como regras e regulamentos para operações de produção (WANG & LI, p.4, 1991)

Gera informações técnicas que serão de utilidade para várias funções da empresa, como o planejamento e controle da produção (utilização de máquinas, programação correta,

controle da produção), a organização da produção (estudo de fluxo, definição de layout, viabilidade de produção em células ou mini-fábricas), a produção (garantia de qualidade, apoio ao operador e preparador de máquina, diminuição de custos), a qualidade (padrões, planos de inspeção, definição de procedimentos da norma ISO), a contabilidade (cálculo de custos, análise de custos ainda na fase de engenharia para comparação de soluções), e também o planejamento estratégico (com a junção dos resultados do plano com uma previsão de vendas pode-se definir necessidades e investimentos em pessoal, material, equipamentos, uma programação de expansão de áreas e até uma política de pessoal para atender à futura demanda) (ROZENFELD, 1989LD).

A qualidade dos planos de processo influencia diretamente o grau de complexidade do trabalho preparatório para a manufatura, seu tempo, a qualidade dos produtos/peças manufaturados, o grau de complexidade da programação da produção e seqüenciamento de operações, os períodos de planejamento da produção (“time spans”), e os custos e tempos de produção (WANG & LI, p.4, 1991).

Lembra-se aqui que a meta global dos planejamentos do processo e da produção é alcançada quando cada peça for produzida bem pouco antes da data conveniente (minimizar inventário), no modo mais econômico e obviamente com as especificações do projeto (HOUTEN, 1991).

Como existem alternativas de planos de processo, sua qualidade deve ser avaliada tanto do ponto de vista tecnológico como econômico (WANG & LI, p.4, 1991). Na tentativa de resolver um problema de planejamento em geral, uma pessoa tem que levar em conta os seguintes domínios: solução de problema, restrições, alcance de metas, utilização de recursos, resolução de conflitos (KIRITSIS, 1995).

Por garantir a qualidade requerida ao produto final, a redução do custo e tempo de produção, o planejamento de processo tem uma importância chave para a manufatura (WANG & LI, 1991).

Planejamento de processo é o ato de preparar documentação detalhada de processamento para a manufatura de um componente ou uma montagem (HOUTEN, 1991).

Vários outros autores também definiram planejamento de processo, como SALOMONS *et al.* (1993), ROZENFELD *et al.* (1996), CAY & CHASSAPIS (1997), KRUTH *et al.* (1994), HÄMMERLE *et al.* (1991), KIRITSIS (1995), ROZENFELD (1994), WANG & LI (1991), SORMAZ & KHOSHNEVIS (1997), OLIVEIRA & ROZENFELD (1997), HALEVI & WEILL (1995), KANAI *et al.* (1989). Compilando as várias definições: O processo de planejamento de processo lida com as atividades de engenharia envolvidas com a seleção e definição dos processos (e objetos) que têm que ser realizados (utilizados)

para transformar econômica e competitivamente a matéria-prima em uma dada forma especificada no projeto, além da especificação dos procedimentos de montagens dos produtos finais.

A interpretação do modelo do produto representa o começo do planejamento do processo (HOUTEN, 1991). Faz-se necessário uma análise compreensiva da estrutura da peça, seu material e especificações técnicas, volume de produção e condições de manufatura (WANG & LI, 1991). Obviamente, antes de se tomar as decisões finais sobre o plano de processo, uma grande quantidade de trabalho preparatório tem de ser realizado. Para as tomadas de decisões o processista usa dados padrão e livros auxiliares como padrões de tolerância, nomes de códigos de materiais de diferentes padrões, padrões de rugosidade superficial, normas internas, especificações de máquinas e capacidades, dados de ferramentas e dispositivos, dados de condições de corte, operações, e outros (HALEVI & WEILL, 1995). A seleção dos melhores processos, máquinas-ferramenta, fixações, métodos de usinagem e ferramentas não pode ser realizada seqüencialmente por causa da existência de relações mutuamente dependentes entre várias entidades de manufatura e a impossibilidade de avaliar soluções viáveis em detalhes nos primeiros estágios do planejamento (HOUTEN, 1991).

Deve-se diferenciar se o planejamento de processo está comprometido com uma nova planta ou chão-de-fábrica a ser construída, ou se com uma já existente (WANG & LI, 1991). Em produção de alto volume, o planejamento de processo é desempenhado mesmo antes dos equipamentos de manufatura serem instalados e os planos de processo são virtualmente incorporados no layout e mecanização do sistema de manufatura (HOUTEN, 1991). Se a planta já existe e opera na fabricação de lotes pequenos ou médios, deve-se planejar o processo sob as restrições de recurso dela e paralelamente analisar a viabilidade ou não de realizar novos investimentos em equipamentos.

2.6.2 Localização em relação ao fluxo de informação

O fluxo de informação nos sistemas produtivos tem início a partir do setor de marketing ou vendas que solicita o desenvolvimento de um novo produto. Sendo o elemento fabricado na estrutura do produto, o setor de processos recebe do PCP o pedido de uma peça e suas especificações do setor de projeto. Obtém-se um plano de processo que serve de base à fabricação. Esse plano pode também conter croquis/projeto/especificação de dispositivos, croquis da peça em estados intermediários de fabricação, lista de ferramentas com croqui de montagem, e programa CN. As operações de inspeção são utilizadas pela qualidade, e a

seqüência de operações com seus tempos serve de base à programação da produção. A especificação dos dispositivos deve estar à disposição da ferramentaria o quanto antes para produzi-los. Os croquis da peça com seus estados intermediários servem de apoio às operações de inspeção da qualidade e ao operador de máquina. A lista de ferramentas facilita a preparação das operações e pode ser utilizada pelo MRP II no cálculo das necessidades. O programa CN associado ao plano é enviado à fabricação (ROZENFELD, 1992).

Lembra-se que esta localização não é rígida, e na visão por processos pode sofrer algumas alterações.

2.6.3 Plano de processo e seu nível de detalhamento

Um plano de processo pode ser pensado como uma coleção de processos individuais organizados em uma estrutura coerente direcionada a atingir alguma meta (HÄMMERLE *et al.*, 1991). O plano de processo é o documento básico resultante do planejamento do processo (ROZENFELD, 1992). Sua estrutura depende do nível de detalhamento e das informações necessárias para cada empresa.

O nível de detalhamento é de grande importância, e existe um nível ótimo de detalhe que um plano deve ter. Quanto mais se planeja, menos tempo se perde no chão-de-fábrica, mas em compensação aumenta o custo de planejamento. A grosso modo o nível ótimo de detalhamento do plano depende dos seguintes fatores em ordem decrescente de importância: *Tipo e volume de produção, complexidade e custo da peça, qualificação do operário e processista, tipo e complexidade de equipamento*, e outros. Maior o volume de produção, maior o nível de detalhamento necessário, a fim de ganhar tempo e evitar “grandes perdas”, pois é alto o custo de produção envolvido. Maior a complexidade e custo da peça, maior o nível de detalhamento a fim de evitar perdas. Maior a qualificação do operário, menor o nível de detalhamento necessário por motivos óbvios. Equipamentos mais caros e complexos, mais detalhes necessários no plano.

2.6.4 Funções e métodos de planejamento

O planejamento do processo e operações compreende (ROZENFELD, 1992):

- Definição dos dados organizacionais;
- Determinação da peça em bruto;
- Determinação das operações e sua seqüência;



- Determinação de equipamentos;
- Determinação de sub-operações;
- Programação Comando Numérico;
- Determinação de ferramental (incluindo dispositivos de fixação);
- Cálculo das condições de trabalho;
- Cálculo dos tempos de fabricação.

Outras funções que são desempenhadas com menos regularidade:

- Cálculo de sobremetal;
- Elaboração de croquis e ilustrações;
- Simulação do processo;
- Análise de valores e consultoria ao projeto.

Os métodos para se realizar essas funções no planejamento convencional podem ser classificados em *variante* e *generativo*, segundo (ROZENFELD, 1992).

O **método variante** considera a realização das funções através da recuperação e pequena modificação de um plano de processo já completo base para a família da peça correspondente.

O **método generativo** é o jeito normal de se realizar um plano a partir do zero apenas com a experiência do projetista.

Se a repetibilidade das peças for muito alta, aplica-se o método variante.

2.7 Planejamento do Processo Assistido por Computador (CAPP)

Devido à crescente importância do planejamento de processo no desenvolvimento de produto atualmente, aumenta também os requerimentos a sistemas computacionais que vêm a auxiliar e otimizar esse processo. Neste capítulo é apresentado uma revisão sobre o planejamento de processo assistido por computador (CAPP), e no próximo (item 2.8) especificamente os sistemas CAPP generativos automáticos.

2.7.1 Características do planejamento de processo convencional e razões para a sua assistência por computador

O planejamento de processo convencional apresenta algumas características que resultam em problemas.

Nas empresas ainda continua a ter uma grande quantidade de papéis circulando. Isso leva à necessidade de uma digitação demorada em sistemas que utilizam as informações do planejamento do processo, como sistemas de PCP (ROZENFELD, 1994).

Para elaborar um plano de processo, o processista recorre a uma edição manual em papel, ou utiliza um editor de textos através da edição direta pelo processista ou indireta, onde o processista preenche um formulário e o entrega a um digitador, que posteriormente o devolve para sua conferência (ROZENFELD, 1992). Um estudo mostrou que um processista perde 63% do seu tempo na redação do plano em si, e 20% na recuperação de informações necessárias, deixando claro o potencial de otimização do planejamento (83%).

Devido à falta de sistematização, a recuperação de informações e de planos anteriores é muito lenta, além da falta de padronização e da dificuldade de se gerenciar todo o material fonte de informações como manuais e catálogos. A falta de padronização muitas vezes leva a inconsistências e erros de interpretação. Com isso diminui-se o rendimento na elaboração e a qualidade dos planos. A dificuldade organizacional leva a uma dificuldade na atualização das especificações, podendo levar a perdas de produto.

As funções de cálculo do planejamento não possuem um auxílio computacional, podendo haver imprecisões (por exemplo nos orçamentos), e fazendo com que seja uma atividade demorada.

Devido a esses problemas, empresas contratam mais processistas, que passam a realizar tarefas mais burocráticas e ainda não conseguem realizar um trabalho preciso e no tempo necessário. Com uma maior quantidade de pessoas envolvidas na definição dos planos, as especificações técnicas tornam-se mais diversificadas, necessitando-se de mais ferramentas, aumentando a complexidade do PCP, dificultando a produção, etc., aumentando o custo e tempo de lançamento do produto final. Nos momentos de maior demanda, esses processistas, por terem que realizar também tarefas burocráticas, não conseguem manter a qualidade do planejamento do processo (ROZENFELD, 1994).

O planejamento do processo assistido por computador (CAPP) ajuda a diminuir essas dificuldades por várias razões. Os papéis podem ser eliminados da engenharia de processos, obtendo-se uma base de informação confiável que pode ser acessada a qualquer local da empresa se existir um sistema distribuído de informação. O uso de computadores em outros setores da empresa faz com que seja necessária a utilização de computadores também no planejamento do processo para se evitar um descompasso no fluxo de informação da empresa, com os outros setores produzindo e operando informações mais rapidamente que o planejamento de processo, por exemplo um sistema de PCP precisará do plano de processo

quando for necessário modificar uma programação e liberar uma nova ordem de produção (ROZENFELD, 1992; ROZENFELD, 1994).

Outras razões para a aplicação do CAPP em uma empresa são apresentadas como seus benefícios no item seguinte.

2.7.2 O Planejamento de Processo Assistido por Computador e seus benefícios

A idéia e viabilidade de desenvolver planos de processo usando computadores foi primeiramente apresentada por NEIBEL (1965)¹⁵ *apud* [CAY & CHASSAPIS (1997); HOUTEN (1991)]. No ano seguinte SCHENK (1966)¹⁶ *apud* CAY & CHASSAPIS (1997) discutiu a viabilidade do planejamento de processo automatizado, e subseqüentemente BERRA & BARASH (1968)¹⁷ *apud* [CAY & CHASSAPIS (1997); HOUTEN (1991)] investigaram o planejamento e otimização de processos com metal. Em 1976 o primeiro sistema CAPP foi desenvolvido sob patrocínio do CAM-I (Manufatura Assistida por Computador Internacional) e no mesmo ano MIPLAN foi desenvolvido pela OIR (Organização de Pesquisa Industrial) e apresentado por HOUTZEEL (1976)¹⁸ *apud* CAY & CHASSAPIS (1997), ambos utilizando o enfoque variante com peças sendo agrupadas por famílias por um sistema de codificação e um plano padrão sendo gerado para cada família, armazenado, e quando um plano para uma nova peça é necessário recupera-se o plano padrão e modifica-se se necessário. Assim mais pesquisadores e companhias interessaram-se em desenvolver sistemas CAPP (CAY & CHASSAPIS, 1997), e esses sistemas começaram a receber muita atenção na indústria, tendo seus motivos (WANG & LI, p.205, 1991). O desenvolvimento histórico do CAPP seguiu do planejamento *manual*, passando para o *assistido por computador e interfaceado*, e mais recentemente para o *integrado e inteligente*, utilizando técnicas de inteligência artificial (KIRITSIS, 1995).

Planejamento de Processo e operações Assistido por Computador (CAPP) pode ser identificado, segundo HOUTEN (1991), como qualquer programa de computador que oferece algum suporte na área de planejamento de processo e/ou operações, tal como por

¹⁵ NIEBEL, B.W. (1965). Mechanized process selection for planning new designs, ASTME paper 737.

¹⁶ SCHENK, D.E. (1966). Feasibility of automated process planning, PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.

¹⁷ BERRA, P.B.; BARASH, M.M. (1968). Investigation of automated process planning and optimization of metal working process, Report n.14, Purdue laboratory for applied industrial control, West Lafayette.

¹⁸ HOUTZEEL, A. (1976). The MICLASS system. Proceedings of CAM-I's executive seminar-coding, classification, and group technology for automated planning, p-76-ppp01, CAM-I, Arlington, TX, USA.

exemplo processadores de texto dedicados que podem ser usados para a preparação de planos de trabalho para operações de usinagem (convencionais) e tarefas auxiliares.

Os sistemas de apoio ao planejamento de processo buscam cada vez mais organizar e agilizar as atividades de escrever e recuperar informações (verificar se uma ferramenta pode ser adaptada em uma máquina ou encontrar uma máquina através de um catálogo), além de efetuar cálculos e decisões, aumentando a precisão das informações geradas (ROZENFELD *et al.*, 1996). Bancos de dados de informações e algoritmos computadorizados podem ser usados pelo CAPP para selecionar condições viáveis de manufatura (HALEVI & WEILL, 1995).

Pode-se obter uma padronização das informações produzidas pelo CAPP se for feita uma sistematização antes da introdução do computador, eliminando inconsistências (também podem ser feitas amarrações de opções dos menus) de planos obtidos por processistas diferentes e elevando a qualidade da documentação enviada ao chão-de-fábrica, além de minimizar erros de interpretação e de cálculos de fórmulas. Pode-se recuperar informações de planejamentos anteriores, reutilizando-as e diminuindo o tempo gasto no planejamento. Um sistema CAPP deve possuir uma flexibilidade que garanta uma rápida adaptação a possíveis mudanças que possam ocorrer. Assim, se houver poucos processistas que conheçam bem os problemas específicos da empresa, esses podem ser liberados para tarefas mais “nobres” (ROZENFELD, 1992).

O CAPP pode oferecer vários benefícios. As razões para a assistência do planejamento de processo por computador apresentadas no item anterior também podem ser consideradas. Listando resumidamente e de uma forma pontual tanto os benefícios já mencionados como também outros, de acordo com BENEFÍCIOS do CAPP (1999), tem-se: integração com outros setores da empresa; base de informações padronizadas e “inteligentes”; busca pela qualidade da informação e domínio do processo produtivo (ISO/QS 9000); reutilização sistemática de informações; maior produtividade de planejamento; escassez de especialistas; rápida adaptabilidade a mudanças; obtenção precisa e rápida de orçamentos; cotações fora do ambiente de produção; agilidade em estudos de processos alternativos; precisão nas decisões “Make or Buy”; padronização nos tempos de manufatura; aproveitamento de dados semelhantes; facilidade em estudos de redução de custos; possibilidade de atividades distribuídas; maior confiabilidade de informações na produção; procedimentos e documentação conforme ISO/QS 9000; integração com sistemas CAD, CAM, ERP e outros; padronização dos documentos no chão-de-fábrica (melhor layout) com redução de papel; hierarquia para aprovação de roteiros; controle eficaz de revisões em vários níveis; cálculos automatizados (confiabilidade/repetibilidade); roteiros e

estruturas parametrizadas, integradas e variáveis; segurança dos dados; tradução automática de padrões, evitando inconsistências e falta de padronização na comunicação de dados com países de outra língua; diminuição de problemas com especificação de ferramental; memória técnica preservada.

Como benefícios quantitativos, conforme BENEFÍCIOS do CAPP (1999): planejamento 3 a 70 vezes mais rápido; redução do esforço do planejamento de processos em 58%; economia de refugos 12%; redução estoque em processo 10%; economia de materiais 10%; economia de compra de ferramentas 6%; economia de mão-de-obra direta 4%.

2.7.3 Métodos de CAPP

Segundo ROZENFELD (1992) existem 3 técnicas de se chegar a um plano de processo com a assistência do computador: o método interativo, o variante, e o generativo automático. Uma solução híbrida também pode ser utilizada.

2.7.3.1 Método interativo

Antes de apresentar este método, vale diferenciá-lo da edição indireta e direta de um plano de processo no computador sem a sua assistência (o que não é CAPP). A edição indireta é mais difundida que a direta, e o processista preenche um formulário e o envia a um digitador que imprime e entrega de volta para o processista conferir. A segunda é a digitação do plano diretamente no terminal pelo processista (ROZENFELD, 1992).

No método generativo interativo ou apenas interativo, o plano de processo é gerado a partir do zero, ou de uma “folha em branco”. O processista continua a elaborar o planejamento apenas com sua experiência de interpretar o desenho da peça e confeccionar o plano, por isso seu tempo de confecção não é muito satisfatório (ROZENFELD, 1996), mas ele tem algumas facilidades. Escolhe as operações, ferramentas e máquinas, que já estão padronizadas e cadastradas no sistema, assim não precisa digitar e ao mesmo tempo está elaborando um plano padronizado. Os sistemas podem possuir uma amarração das opções dos menus, para restringir e facilitar as escolhas quando há muitas opções. Filtros de dados também podem ser usados. Isso diminui inconsistências e aumenta a produtividade do planejamento.

2.7.3.2 Método variante

As idéias de Mitrofanov e Opitz sobre classificação de peças e Tecnologia de Grupo (TG) levaram ao desenvolvimento de sistemas de classificação baseados em computador

para suporte ao projeto e planejamento de processo (HOUTEN, 1991). Os primeiros sistemas CAPP foram desenvolvidos utilizando este princípio. No enfoque variante, um grupo de planos de processo padrão é estabelecido para todas famílias de peças identificadas através de Tecnologia de Grupo (TG). E quando um novo plano é requerido, um plano padrão aplicável é recuperado e editado para se ajustar aos requisitos específicos da nova peça (HOUTZEEL, 1998).

O princípio da TG é relativamente simples: Usar um bem estruturado Sistema de Classificação e Codificação (SCC) para identificar componentes e processos similares. E quando “famílias de peças” são identificadas, podem ser manufaturadas com planos de processo padronizados (HOUTZEEL, 1998).

A informação mínima para um plano padrão é a seqüência de operações. Então fora pequenas mudanças no plano macro, somente se realiza o detalhamento das operações (ROZENFELD, 1992).

Segundo ROZENFELD (1992), o termo “plano padrão” na verdade poderia ser entendido como um “plano base”, que poderia ser classificado em 3 tipos. Dependendo do caso, este “plano base” poderia ser um “plano semelhante”, que é o plano de uma peça já existente escolhida como a mais parecida com aquela a ser planejada; poderia ser um “plano padrão” propriamente dito, que seria um plano de uma peça existente ou inexistente representante da família que proporcionasse uma mínima mudança possível nos planos da maioria das novas peças. Esse plano padrão poderia ser o plano de uma peça existente; poderia incorporar todas as características (ou operações) de todos planos pertencentes à família; poderia ser resumido com parâmetros a serem completados; poderia ter seqüências básicas, etc. Um breve procedimento de como se obter os planos padrão no caso de se trabalhar com um SCC pode ser visto em ROZENFELD (cap.3, p.10, 1992), e os passos desse trabalho preparatório assim como os de recuperação e modificação são ricamente explicados em WANG & LI (p.208, 1991); um terceiro tipo de “plano base” poderia ser um plano parametrizado, que teria todas as operações dos planos da família acrescidos de regras associadas a cada tipo de operação, que determinam se a operação correspondente fica ou sai do novo plano em função dos parâmetros da nova peça.

HALEVI & WEILL (1995) propõem a idéia de que ao invés de se usar uma árvore de decisão para estabelecer um número de codificação, que permite maior flexibilidade ao sistema de classificação, que é rígido, usa-se a árvore de decisão para recuperar um processo diretamente. Argumenta que a árvore de decisão permite flexibilidade à classificação computadorizada, mas quando um rearranjo das famílias é feito, uma completa reorganização dos arquivos de planos de processo mestre tem que ser feita. Assim cada nova

peça teria seus processos mestres diretamente obtidos da árvore de decisão e seu plano seria posteriormente modificado pelo processista. Para um processista tomar decisões e selecionar um processo ele tem que considerar todos os parâmetros da peça, e um SCC é apenas um compromisso entre o número de features/parâmetros (que devem afetar o número de codificação), e o número de dígitos no número.

Em uma introdução, o CAPP pode utilizar somente os atributos mais gerais das peças, evitando as medidas demoradas da obtenção de um SCC (ROZENFELD, 1992).

2.7.3.3 Método generativo automático

No enfoque generativo, uma tentativa é feita para sintetizar cada peça individual usando algoritmos que definem as várias decisões tecnológicas que devem ser feitas no curso da manufatura (HOUTZEEL, 1998). Ou informações de processo são sintetizadas para criar um plano de processo para um novo componente automaticamente (CHANG & WYSK, 1985; HAM & LU, 1989) baseado nos dados de projeto e no conhecimento disponível em planejamento do processo (SORMAZ & KHOSHNEVIS, 1997). Em um sistema realmente generativo, a seqüência de operações assim como todos parâmetros de processo seriam estabelecidos automaticamente, sem referência a planos prévios (HOUTZEEL, 1998).

Por estar no escopo deste trabalho, os sistemas CAPP generativos automáticos são apresentados em mais detalhes no capítulo 2.8.

2.7.3.4 Solução híbrida

Cada um dos métodos isolados tem suas vantagens e desvantagens. Portanto uma solução híbrida que reúna as vantagens de cada método, dependendo da aplicação, seria mais abrangente.

Segundo ROZENFELD (1992), em um sistema híbrido poderia-se utilizar qualquer método ou combinação, dependendo do caso. Se se está planejando o processo de peças novas e mais complexas, onde as atividades de tomada de decisão macro (como a escolha de operações) são mais importantes, utiliza-se o método assistido interativo, que permite que essas atividades possam ser feitas utilizando a experiência do processista, que sabe bem a melhor decisão para a empresa (os sistemas totalmente automáticos podem não ter uma base de conhecimento adequada a todas as condições da empresa). Algumas funções mais determinísticas do planejamento são mais fáceis de serem automatizadas, e podem ser, como o cálculo dos tempos de fabricação, parâmetros, condições de usinagem, orçamentos, etc. Essas atividades são mais “braçais” e se automatizadas aumentam a produtividade e precisão do planejamento. Se se estiver planejando o processo de peças pertencentes a famílias mais

ou menos comportadas, utiliza-se o variante com as modificações necessárias através do interativo. Se as peças pertencem a famílias bem comportadas mas são necessárias muitas alternativas no processamento (que poderia ficar a cargo do computador) aplica-se o automático. Bem comportadas porque o domínio torna-se menor para a elaboração de regras e algoritmos (base de conhecimento) que cerquem todas as alternativas de tomada de decisão. A representação da peça precisa ser adequada ao mecanismo de inferência. Após a elaboração do plano automaticamente, deve-se verificar e mudá-lo, se necessário, com o interativo.

Na bibliografia comum em língua inglesa, fala-se apenas dos métodos variante, generativo (automático), e semi-generativo. Segundo HALEVI & WEILL (1995), um sistema semi-generativo seria um sistema “quase totalmente automático” que poderia ser usado até o generativo totalmente automático ser desenvolvido. Esse sistema possuiria todos os componentes de um automático, e o plano final e seus estágios intermitentes seriam modificados e suplementados pelo processista. A modificação seria bem menor que a necessária no variante.

2.8 Planejamento de Processo Automatizado por Computador

No final dos anos 70 emergiu uma nova geração de sistemas CAPP, chamados generativos (automáticos) (HOUTEN, 1991). Esses são o objetivo maior de todas as pesquisas existentes em CAPP (ROZENFELD, 1992).

As definições desses sistemas estão descritas no item 2.7.3.3.

Automatizar a tarefa de planejamento do processo significa que os padrões de raciocínio de um processista humano, que são difíceis de capturar e formular, tenham que ser expressos em um jeito formal introduzindo “conhecimento de manufatura” (KRUTH *et al.*, 1994). Essa é a maior barreira que esses sistemas encontram.

As maiores vantagens desses sistemas residem na grande repetibilidade, constância (assim menos subjetividade e uma bela uniformidade) dos resultados de planejamento e na grande velocidade com que os planos são gerados [(KALS *et al.*, 1990¹⁹; ELMARAGHY,

¹⁹ KALS, H.J.J.; van HOUTEN, F.J.A.M.; TIEMERSMA, J.J. (1990). CIM in small batch part manufacturing. *Proceedings of the 22nd CIRP international seminar on manufacturing systems*, University of Twente, The Netherlands.

1993²⁰) *apud* KRUTH *et al.*, 1994; ROZENFELD, 1992; HOUTZEEL, 1998]. Muito mais planos alternativos podem ser explorados através de um vasto número de comparações feitas por computador (HOUTZEEL, 1998). Também não é necessária uma interferência humana no processo de decisão (HOUTEN, 1991; ROZENFELD, 1992). Esses fatores levam a um grande retorno de investimento (SMITH, 1981; ROZENFELD, 1992), mas isso é relativo, pois segundo HOUTZEEL (1998), é válido quando se tratam de grupos de peças ou operações de montagem similares. Entretanto, esses sistemas também apresentam algumas fraquezas que põem em risco a sua aplicabilidade em indústrias.

A primeira tarefa no planejamento de processo é a interpretação do modelo da peça, do ponto de vista do projeto e principalmente do planejamento de processo. Os sistemas CAPP generativos automáticos e integrados precisam realizar essa tarefa automaticamente, a partir do modelo da peça projetada no CAD, para que ocorra uma automação completa do processo envolvido desde o modelo pronto no CAD até a geração dos resultados de planejamento.

Como todos os esforços nesse sentido têm sido feitos usando o conceito de features, porque por terem significado em engenharia o CAPP automático pode utilizá-los como entrada no sistema para derivar seus resultados de planejamento de processo (JI & MAREFAT, 1997), torna-se necessário que o CAPP realize o reconhecimento automático de features do modelo da peça do CAD, ou então que permita a definição interativa de features pelo engenheiro de manufatura (neste último caso a transferência de informação no processo não é totalmente automática- ver definição interativa de features no item 2.8.2).

2.8.1 Reconhecimento de features

Neste enfoque os features de aplicação são automaticamente ou interativamente reconhecidos do modelo do objeto sob consideração, seja de desenhos manuais ou modelos em CAD, feitos em modeladores convencionais sólidos ou 2D, ou baseados em feature. O reconhecimento pode ser manual por assistência humana, onde a pessoa reconhece features pré-definidas da imagem da peça, seja de desenhos manuais, modeladores convencionais, ou baseados em feature. O reconhecimento automático de features tem sido em pesquisa uma disciplina focando no projeto e implementação de algoritmos para detectar features de manufatura (furos, chavetas, etc) da representação da peça (HAN & ROSEN, 1998). Um

²⁰ ELMARAGHY, H.A.; ELMARAGHY, W.H. (1992). Bridging the gap between process planning and production planning and control. *Proceedings of the 24th CIRP international seminar on manufacturing systems*, p.1-7, Copenhagen.

interpretador de um modelo CAD poderia servir para traduzir entidades de baixo nível (faces) para um grupo de features úteis para a manufatura. É notado que para muitos sistemas a maioria das tarefas de reconhecimento estão incluídas dentro dos deveres do planejamento do processo (assistido por computador - CAPP) (JI & MAREFAT, 1997).

Apesar de ter havido duas décadas em pesquisa em reconhecimento de features, e de ter havido um progresso significativo, parece não haver nenhum sistema totalmente automático a não ser em problemas bem específicos. A maior parte dos trabalhos procedeu-se individualmente, cada um com a sua própria definição de feature e suas visões de seus papéis na integração CAD/CAM (HAN & ROSEN, 1998). Os sistemas na maioria reconhecem features de modelos sólidos (DAVIES, 1997), e poucos também reconhecem de modelos CADDrawings ou imagens scaneadas (PRABHU & PANDE, 1999).

Os algoritmos de reconhecimento podem ser categorizados em geral pelo tipo do modelo de entrada (arame 3D, B-Rep, CSG, etc.), forma da peça (faces planas, não planas), técnicas (reconhecimento de padrão sintático, teoria de grafo, redes neurais, etc.) e aplicação final (classificação TG, planejamento do processo, seleção de máquina-ferramenta), etc. (PRABHU & PANDE, 1999). Métodos de reconhecimento automático de features em mais detalhes assim como questões importantes sobre o assunto podem ser referenciados em JI & MAREFAT (1997).

Os algoritmos de reconhecimento não receberam grande atenção pois visam uma classe e geometria específicas de features e tendem a uma falta de generalidade para formas mais complexas. E visam features geométricos simples como furos, rasgos, etc., desconsiderando dados não geométricos (PRABHU & PANDE, 1999). Dificuldades para o reconhecimento automático também residem na falta de definições padrão de features (JI & MAREFAT, 1997). Outra dificuldade são as interações de features, como intersecção geométrica (DAVIES, 1997; JI & MAREFAT, 1997), que geralmente produzem uma nova versão de um feature, além de gerar interpretações alternativas. Porém, sistematicamente, a geração de interpretações alternativas é muito útil do ponto de vista do planejamento do processo, pois permitem aos planejadores de processo analisar as alternativas e gerar planos melhores em termos de custo, qualidade, ou ambos. Interpretações que provém acessos a todos features por menos direções de acesso podem gerar melhores planos de processo pois diminuem muito o tempo de produção através de menos *setups* (JI & MAREFAT, 1997).

O reconhecimento de features de desenhos de peças e montagens pode ser útil devido ao grande número de indústrias que utilizam esse tipo de representação. Modelar um grande número de peças novas e existentes usando modeladores sólidos ou baseados em

feature seria um trabalho intensivo e propenso a erros, levando a maiores *lead times* e custos (PRABHU & PANDE, 1999).

Além do reconhecimento automático de features, uma outra alternativa para os sistemas CAPP integrados é permitir a definição interativa de features no CAD, que é descrita no item seguinte.

2.8.2 Definição interativa de features

Neste enfoque features são definidos por assistência humana ou interativamente.

A definição de feature por assistência humana provê uma maneira para um engenheiro de manufatura qualificado interativamente pegar e agrupar elementos geométricos ou entidades topológicas (arestas, faces) de um modelo (imagem da peça) de modo que o agrupamento adere à definição de um feature de manufatura padrão. Essa informação pode subsequente ser estendida com atributos como tolerâncias, rugosidades e atributos de mais alto nível como diâmetro do furo, profundidade, posição da linha de centro, etc. Esse método pode ser facilmente aplicado em modeladores B-rep e tem sido usado por muitos pesquisadores para gerar os dados de entrada para seus sistemas CAPP e de programação CN [(CHANG, 1982²¹; HUMMEL & BROOKS, 1986²²; NAU & GRAY, 1986²³) *apud* HOUTEN, 1991]. Uma desvantagem deste enfoque é que não provê para uma transferência automática de informação entre projeto e produção. A vantagem é que permite ao projetista projetar a peça do jeito que seja mais conveniente (JI & MAREFAT, 1997).

A nível de comparação, a FIGURA 7 abaixo ilustra as três visões principais para se obter os features, de acordo com o item 2.5.3:

²¹ CHANG, T.C. (1982). TIPPS – a totally integrated process planning system, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute.

²² HUMMEL, K.E.; BROOKS, S.L. (1986). Symbolic representation of manufacturing features for an automated process planning system, ASME winter annual meeting, Anaheim.

²³ NAU, D.; GRAY, M. (1986). SIPS: an application of hierarchical knowledge clustering to process planning, ASME winter annual meeting, Anaheim.

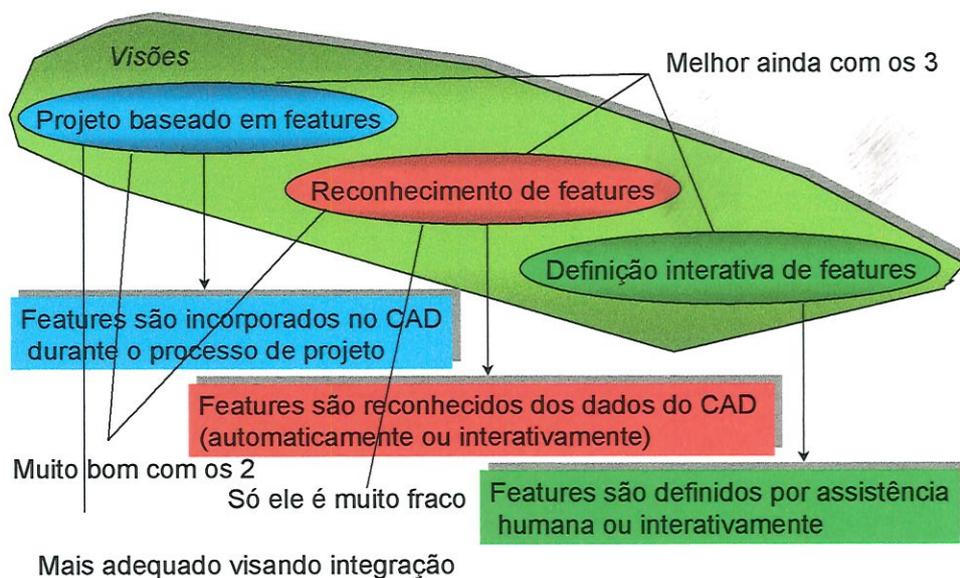


FIGURA 7: Formas de se estabelecer features

O reconhecimento de features sozinho seria fraco, pois além de ser uma atividade propensa a erros de interpretação, não resolve o problema de se conseguir uma maior integração entre os processos de projeto e planejamento de processo, e uma barreira entre essas duas atividades continuaria a existir, dificultando a Engenharia Simultânea. O projeto continuaria tendo apenas a visão do projeto, esquecendo das dificuldades que poderiam vir a ocorrer na manufatura.

O projeto baseado em features é o mais promissor visando a integração entre projeto e planejamento de processo e a integração entre CAD e CAPP, pois o modelo da peça já é construído e armazenado juntamente com o raciocínio que o projetista teve na hora de projetar, seja raciocínio funcional de projeto, ou funcional mais de manufatura mais de montagem (viabilizando a Engenharia Simultânea e a integração CAD-CAPP). O modelo torna-se mais rico em informações e mais padronizado, melhorando custos, qualidade e tempo.

Se os sistemas CAD vierem a auxiliar o projetista com informações de manufatura, e esses projetistas forem mais capacitados nesse aspecto, talvez não fosse mais necessário o reconhecimento automático de features, pois o modelo já seria construído também com features de manufatura. Se isso não puder ser feito, as duas primeiras visões juntas (ver FIGURA 7) seriam muito promissoras para a integração CAD-CAPP, e um sistema que permitisse as três visões seria ainda melhor, provendo ainda flexibilidade na definição dos features para uma melhor adequação a cada empresa.

Depois de interpretado o modelo do CAD automaticamente do ponto de vista do planejamento de processo pelos sistemas CAPP generativos automáticos e integrados, torna-se necessário derivar os resultados de planejamento de processo a partir da interpretação feita, também de forma automática. Quanto maior o escopo de peças que o sistema suporta, mais difícil essa tarefa se torna, e alguns sistemas CAPP acabam utilizando a técnica de Inteligência Artificial (AI), tornando-se sistemas especialistas (ES), ou baseados em conhecimento (KBS), ou baseados em inteligência artificial.

A seguir são apresentados os principais componentes de função de um sistema de planejamento de processo automatizado por computador.

2.8.3 Componentes funcionais de um sistema CAPP automático

Os três maiores componentes funcionais de um sistema de planejamento de processo generativo automático são: descrição da peça/produto; inferência e o conhecimento em planejamento de processo; e a base de dados.

2.8.3.1 Descrição da peça/produto

Há muitos modos para se descrever um objeto. Os métodos correntemente utilizados por engenheiros mecânicos que trabalham com ou sem sistemas computadorizados são: linguagem natural, rascunhos à mão livre, desenhos de engenharia, modelos físicos, Tecnologia de Grupo, representação simbólica [material, tamanho de estoque, tamanho de lote, etc. (SORMAZ & KHOSHNEVIS, 1997)], e modelos em CAD. Em todos os modelos previamente discutidos, a informação tem que ser traduzida para um formato computacional (KIRITSIS, 1995) que sirva como entrada para sistemas CAPP automáticos. O último é o mais importante para a automação e integração do CAPP dentro do conceito CIM, mas correntemente a maior parte dos sistemas CAD podem criar e manipular informação geométrica apenas, o que é indispensável mas não suficiente para sistemas CAPP automáticos e integrados (KIRITSIS, 1995).

A descrição da peça é a informação fundamental às atividades de planejamento de processo, pois serve como base às inferências (automáticas ou humanas). Dependendo do método de planejamento pode-se usar um tipo de representação. Em CAPP, para o interativo assistido necessita-se apenas da visualização da peça (desenho técnico ou outras), pois é o processista que realiza as inferências; no variante necessita-se da classificação da peça (pode ser um código TG) para a recuperação de planos, além da visualização da peça; e finalmente no generativo automático necessita-se de representações mais formais visando a inferência

automática (ROZENFELD, 1992), que são discutidas a seguir. Segundo ROZENFELD (1992), essas representações dividem-se em 2 grupos: linguagens descritivas e representações em CAD.

2.8.3.1.1 Linguagens descritivas

Essas linguagens podem ser classificadas da seguinte maneira (ROZENFELD, 1992):

1. **Códigos TG ou tabela de atributos característicos:** Estes representam a peça de maneira incompleta (semântica pobre) pois seu objetivo é apenas classificar as peças. Sua aplicação no CAPP automático só é válida para peças mais específicas e relativamente simples de caracterizar (engrenagens simples, eixos bem comportados, etc.). E o código deve ser complexo o suficiente para apoiar a inferência automática.
2. **Peça parametrizada:** Esse tipo de representação apareceu nos primórdios do CAPP automático, quando sua aplicação restringia-se a peças bem específicas e com descrição complexa. Agora essa representação torna-se novamente atual com a existência de sistemas CAD parametrizados modernos e a integração CAD/CAPP é facilitada se o escopo for peças paramétricas.
3. **Específicas:** São linguagens com características particulares para adaptação a sistemas específicos. Essas linguagens foram desenvolvidas quando os sistemas CAD ainda não eram apropriados à integração. Hoje existem em sistemas CAPP de pouca aplicação.

2.8.3.1.2 Representações em CAD

Podem ser classificadas em (ROZENFELD, 1992):

4. **Representação em arame (wireframe):** As técnicas de modelagem wireframe, CSG e B-rep estão descritas respectivamente nos itens 2.4.3.1.1, 2.4.3.2.1 e 2.4.3.2.2 desta revisão, aqui é descrita a importância das suas aplicações para a descrição da peça/produto ao CAPP automático. Pode ser usada para representar peças simples (rotacionais e simétricas) no apoio a certas funções do planejamento de processo, sendo incompleta para inferências mais complexas como determinação da seqüência de fabricação. Sua melhor aplicação é no cálculo da trajetória da ferramenta na programação CN de peças rotacionais.

5. **Representação em volume (CSG):** Seria apropriado somente no caso de volumes subtrativos no modelamento, que correspondam ao cavaco a ser retirado da peça. Todavia somente essa representação é incompleta para o CAPP automático, pois grande parte dos sistemas CAD que modelam com volumes (CSG) não armazenam informações tecnológicas sobre as superfícies e nem sobre os limites dessas superfícies. E essas informações são imprescindíveis ao planejamento automático.
6. **Representação em superfícies (B-rep):** Do ponto de vista de entidades geométricas de mais baixo nível (os features são entidades de nível mais alto, e as técnicas de modelagem baseadas em feature podem utilizar CSG ou B-rep para representá-los), esta é a técnica de modelagem em CAD mais apropriada para representar peças/produtos ao CAPP automático, pois pode representar parâmetros tecnológicos das superfícies da peça (rugosidades, tolerâncias). Entretanto seu processamento é complexo e a simples existência dessa representação não garante que as informações tecnológicas estejam presentes nos dados do modelo em CAD. Porém pode-se associá-las às superfícies de uma forma natural. Então se os features forem representados por B-rep, eles também podem armazenar esses parâmetros tecnológicos.

Os features podem ser representados ambos descritivamente e/ou através de sistemas CAD (ROZENFELD, 1992), pertencendo a ambas as classificações (dos itens 2.8.3.1.1 e 2.8.3.1.2 acima). O capítulo 2.5 apresenta a modelagem baseada em feature e as suas vantagens como a melhor forma de representação da peça/produto ao CAPP automático.

2.8.3.2 Inferência e o conhecimento em planejamento de processo

Um sistema CAPP automático, para a automação da geração dos resultados e tomadas de decisões a partir da descrição das peças/produtos, necessita de uma base de conhecimento em planejamento de processo e de uma máquina de inferência, que permite a realização de inferências automáticas sobre essa base.

A base de conhecimento deve armazenar o conhecimento representando-o. Representação do conhecimento é uma descrição do conhecimento do domínio e descrição de como os vários pedaços de informação interagem (WARNECKE *et al.*, 1989). Deve estar em formatos específicos aplicáveis em computadores. A lógica de manufatura é o conhecimento em planejamento de processo, e árvores de decisão, tabelas de decisão, programas de procedimentos, regras de produção, são representações do conhecimento. As primeiras versões de sistemas CAPP generativos usaram tabelas e árvores de decisão para

capturar a lógica de manufatura (HAM & LU, 1989). Árvores e tabelas de decisão podem ser vistas em HALEVI & WEILL (1995), CHANG & WYSK (1985), KIRITSIS (1995).

Máquina de inferência é um programa de computador que toma decisões sobre como usar o conhecimento de solução de problema achado na base de conhecimento para manipular os dados (HALEVI & WEILL, 1995), segundo uma estratégia definida (ou tipo de mecanismo de inferência). A máquina de inferência, a partir da inferência sobre as representações do conhecimento, possibilitam os resultados e tomadas de decisões.

Sistemas CAPP generativos automáticos não necessariamente precisam ser especialistas, bastam manipular regras, tabelas de decisão, árvores de decisão, programas, etc., e chegar aos resultados de planejamento.

Também há a possibilidade dos sistemas CAPP automáticos utilizarem a técnica de redes neurais para inferir resultados de planejamento. Essa técnica, assim como os sistemas especialistas, também apresenta dificuldades nesse campo.

2.8.3.3 Base de dados

As bases de dados são requeridas para prover aos sistemas CAPP os vários aspectos de informação, como base de dados de máquinas, de ferramentas, dados de usabilidade, etc. Usualmente as bases de dados são específicas a companhias e contém informação particular. Sistemas CAPP recentes utilizam comumente base de dados relacional (KIRITSIS, 1995).

2.9 Formas de integração CAD-CAPP

Um tipo de integração pode ser alcançado pela transferência de features do CAD para o CAPP. Isso torna mais fácil para o CAPP criar os planos de processo. Daí a importância do projeto baseado em features. Lembra-se que os features devem estar em um formato formal e padrão para o ponto de vista do CAPP, para que este possa inferir sobre o conjunto de features os resultados de planejamento de processo.

Um outro tipo de integração pode ser alcançado pela introdução dos dados gráficos, necessários para a interpretação da peça e geração dos planos de processo, no CAPP, sem precisar editá-los novamente. Com a posse dos dados gráficos o CAPP automático pode realizar inferências sobre eles primeiro reconhecendo os features de manufatura e depois planejando o processo, ambos automaticamente. Como realizar as inferências automáticas já é outro problema complexo, discutido nos itens do sub-capítulo 2.8. Ou também o CAPP

pode permitir a sua visualização e interpretação interativa pelo usuário, o que não automatiza por completo o processo de geração dos resultados de planejamento a partir dos dados do CAD. Agora um outro problema é como transferir os dados entre os sistemas, estejam eles em forma de features ou de gráficos apenas.

Existem várias maneiras de integrar considerando apenas a comunicação dos dados entre os sistemas. Essa comunicação pode ser feita via gerenciamento de objetos distribuídos (CORBA, COM-OLE, e outros), via formatos neutros de interfaceamento, via programação e intervenção no programa fonte de cada sistema, via programas que comunicam com a base de dados dos sistemas e recuperam informações e dados, via função DDE do *Windows*, e outras.

Embora esses modos de comunicação de dados são necessários à realização de qualquer tipo de integração de sistemas, a revisão bibliográfica deste trabalho não tomou esse rumo, pois foi dado maior preferência à parte conceitual e à problemática envolvida em uma integração CAD/CAPP automático para peças em geral. A maior dificuldade em uma integração CAD/CAPP é a interpretação da semântica da representação da peça, podendo a simples transferência ou comunicação dos dados ficar a encargo de programadores ou integradores de sistemas.

No entanto, serão revisados no próximo item os formatos neutros de interfaceamento, com maior ênfase no STEP (*STandard for the Exchange of Product and process model data*), uma vez que estes formatos provêm meios de padronização e neutralizam o problema dos diferentes formatos e definições de dados que dificultam enormemente a integração. Além do que o STEP também lida com a padronização para o intercâmbio de features, facilitando o intercâmbio de elementos com semântica em engenharia.

2.9.1 Formatos neutros para o interfaceamento CAD-CAPP

Pela existência de vários tipos de sistemas, bases de dados e comunicações, e pela existência, por vários motivos, de diferentes formatos de dados, estruturas e conteúdo de arquivos, a capacidade para livremente trocar e compartilhar informação é impedida por incompatibilidades. E para promover a integração são necessários métodos e ferramentas para quebrar essa barreira. Os formatos neutros de interfaceamento, juntamente com a existência de pós e pré-processadores, são uma possibilidade.

O formato IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) foi desenvolvido para permitir a transferência de dados gráficos entre diferentes plataformas de hardware e

software (NOLEN, 1989), e não inclui dados relacionados a planejamento de processo e dados com significado em engenharia. Então o CAPP automático teria que inferir esses dados do desenho. Assim, o formato IGES não seria a melhor opção de integração, a não ser se a integração for limitada à visualização e interpretação interativa do modelo gráfico pelo usuário no CAPP.

Outros formatos neutros também foram desenvolvidos como o SET (*Standard d'Echange et de Transfert* - França) e VDA-FS (*Verband der Deutschen Automobilindustrie-Flächenschnittstelle* - Alemanha), e foram encontradas algumas deficiências em seu uso, como por exemplo: ambigüidades de suas definições; restrições no escopo de dados dos produtos representados; inflexibilidade em relação à forma de implementação; falta de procedimentos para verificação de conformidade; ineficiência e imprecisão das implementações (OMOKAWA, 1999).

Em 1984 foi inicializado um projeto pela ISO para desenvolver uma série de padrões internacionais (ISO 10303) para a representação e troca de dados de modelos de produtos nas formas “codificadas-para-computador” e “legíveis-para-humanos”. O propósito do projeto é a descrição de dados de produto e processo durante todo o ciclo de vida de um produto (incluindo projeto, manufatura, uso, manutenção, e disposição) em um formato independente de um sistema específico. Esse projeto é o STEP (*Standard for the Exchange of Product and process model data*).

Os requisitos sobre o STEP são:

- suportar uma definição neutra de informação de produto e processo para a manufatura;
- suportar a troca de informação de produto, com um mínimo de interpretação humana;
- inter-relacionar uma ampla faixa de informação de produto para suportar aplicações em todo o seu ciclo de vida.

Para suportar a troca de dados entre sistemas incompatíveis o STEP usa o seguinte princípio: cada sistema deve possuir um pós ou um pré-processador para respectivamente transmitir ou receber dados do produto. O pós-processador traduz os dados do formato interno do sistema para um formato de acordo com a especificação do STEP (arquivo neutro). O outro sistema receberá o arquivo neutro com os dados no formato STEP e seu pré-processador o traduzirá para seu próprio formato. Assim para uma integração entre todos os sistemas são necessários apenas dois processadores para cada sistema. A FIGURA 8 a seguir ilustra esse princípio.

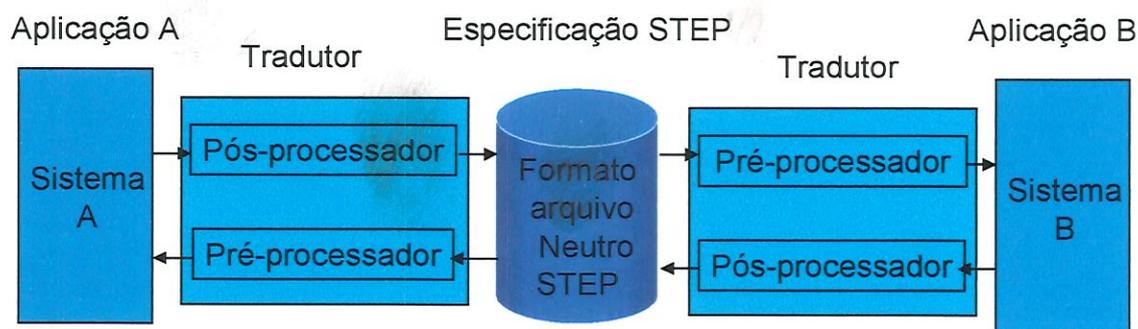


FIGURA 8: Princípio de troca de dados STEP

As informações de produto do STEP podem ser relativas a: geometria, topologia, sólidos, features de forma, desenhos, tolerâncias, material, processos de manufatura, estrutura de produto, arquitetura, apresentação, modelagem por elementos finitos, funções elétricas, produtos elétricos, ou estruturas de navios.

Por estar se tornando um padrão muito grande e complexo, o STEP está estruturado como uma combinação de sub-padrões inter-relacionados chamados peças. Cada peça tem um número indicando sua localização na estrutura ISO 10303. Essas peças não só definem as descrições formais de dados, tipos de dados, recursos integrados, protocolos de aplicação, mecanismos de troca, e teste de conformidade, mas também uma linguagem formal de modelagem de dados chamada EXPRESS para suportar ambos a descrição textual e a representação gráfica da informação modelada (VERNADAT, 1996).

O STEP portanto, por permitir uma definição e descrição rica dos dados do produto e processo, e também de features, de uma maneira explícita e padronizada, é uma boa alternativa para a integração de qualquer sistema CAD com qualquer sistema CAPP que tenham pós e pré-processadores STEP, mas ainda está muito imaturo e por isso acaba restringindo a flexibilidade de uso em ambientes industriais.

2.10 Síntese da revisão bibliográfica

A seguir é apresentada, do ponto de vista do autor deste trabalho, uma síntese desta revisão bibliográfica, de onde se pode extrair aspectos importantes correlacionados à integração CAD-CAPP.

- Esta revisão teve o intuito de mostrar os conceitos necessários e uma base teórica para a integração CAD e CAPP, com ambas a visão do projeto como a do planejamento do processo.

- Deve-se lembrar que uma maneira isolada de se realizar um processo (ex. projeto, ou planejamento de processo) vai contra os princípios da Engenharia Simultânea e da visão abrangente (holística).
- Em relação ao problema de integração CAD/CAPP, não adianta continuar havendo uma “barreira” após o projeto e antes do planejamento de processo, pois assim os problemas de automação e de integração completa tendem a não se resolverem. Sempre haverá diferenças de pontos de vista de interpretação que a integração automática não conseguirá resolver.
- O uso de features (seus vários tipos) em desenvolvimento de produto pode aumentar o grau de padronização das informações do produto, tendendo a amenizar o problema descrito no parágrafo anterior de diferenças de pontos de vista de interpretação.
- O projeto por features, como visto nos itens 2.5.5.4 e 2.5.5.5, tem o potencial de prover benefícios tanto ao projeto como para o planejamento de processo.
- A Engenharia Simultânea prevê clareza de pensamento em atividades de projeto e planejamento de processo, e o uso de features, sendo um elo de ligação, é um meio que facilita e acaba “forçando” projetistas e processistas a lidarem com informação de ambas as partes, aumentando assim essa “clareza de pensamento”.
- Não adianta ficar “olhando” só para a interface entre o CAD e o CAPP e tentar integrar automaticamente. É preciso elevar o nível da visão e enxergar o que pode ser feito no projeto para armazenar entidades com maior semântica e mais alto nível de abstração, a fim de poder transferir essa semântica para o CAPP derivar resultados de planejamento e amenizar problemas de interpretação automática.
- O Projeto Visando “Tudo” (*Design for X*) baseado em features provê meios para aumentar a clareza em desenvolvimento de produto e ao mesmo tempo meios de padronização. Pode assim fornecer melhores projetos do ponto de vista do processo, custos, montagem, qualidade, serviços, etc. E a padronização facilita a integração de sistemas relativos a essas áreas (como o CAD/CAPP).
- A representação apenas geométrica em CAD não representa o raciocínio do projetista e sim um amontoado de entidades geométricas. Todo o raciocínio, seja feito com a visão funcional de projeto ou junto com a de manufatura, é perdido quando a representação é armazenada no formato gráfico.

- Features são um modo de representar tanto conhecimento em projeto como em planejamento de processo. E um mapeamento, associação ou tradução de uma visão a outra pode quebrar a barreira da integração CAD/CAPP se o projeto for baseado em features.
- Os projetistas devem projetar tendo em mente simultaneamente tanto features funcionais como de manufatura, sendo necessário ter uma visão mais ampla.
- Deve-se pensar primeiro não em como integrar CAD e CAPP e sim em como integrar projeto e planejamento do processo, fazendo com que as atividades anteriores já sejam realizadas facilitando as posteriores e com que a informação do desenvolvimento de produto se torne mais “comum” a ambas as partes. Isso também direciona o desenvolvimento e a sistemática de sistemas integrados CAD/CAPP.
- O problema principal em uma integração CAD-CAPP é transformar uma representação de peça em operações de processo, que é uma função de tomada de decisão não determinística. Há uma grande diferença entre o nível da tomada de decisão, que é muito maior, com o nível da representação geométrica, entidades geométricas no espaço 2D ou 3D. Essa diferença dificulta enormemente a automação. Se fosse o contrário, automatizar a modelagem da peça, com as operações de fabricação como entrada, seria mais fácil porque se estaria automatizando um nível mais baixo a partir de um mais alto. Pode-se fazer uma analogia com a derivada e a integral em cálculo. É mais difícil integrar do que derivar, porque a integral está num nível mais alto. Se a modelagem for baseada em features, o nível da representação da peça eleva-se um pouco mais, e se for baseada em features de manufatura, já se pode traçar algumas relações com o planejamento de processo, e com uma base de conhecimento, chegar à automação.

A bibliografia explorada não cita especificamente comentários a respeito da integração CAD-CAPP para peças paramétricas, porque nesse caso a integração não possui toda a problemática envolvida em uma integração que suporta um escopo maior ou genérico de peças. Com peças paramétricas, os resultados de planejamento de processo podem ser gerados pelo CAPP apenas tendo-se como entrada os valores dos parâmetros, através de um trabalho de sistematização, porque todas as possíveis formas das novas peças já são conhecidas *à priori* (ver Introdução, item 1.2). E a integração limita-se apenas à transferência dos parâmetros entre os aplicativos, não sendo necessária a inferência de dados com maior semântica do modelo do CAD. Entretanto, a revisão bibliográfica e a sua síntese

apresentadas são importantes para uma base teórica e contexto mais abrangentes para este trabalho.

3 CONTEXTO DO TRABALHO

Para uma melhor localização deste trabalho, foram elaboradas algumas formas de uso de um sistema CAD integrado a um CAPP automático no contexto do desenvolvimento de produto. Essas formas de uso foram compiladas com base no conhecimento adquirido durante a análise da literatura sobre o tema do trabalho, e utilizam alguns conceitos descritos na revisão bibliográfica.

O texto que segue pode ser acompanhado na FIGURA 9 seguinte, que apresenta simplificadamente o esquema de um sistema CAD integrado a um CAPP generativo automático pela técnica de formatos neutros de interfaceamento. As fechas correspondem à comunicação de dados. As legendas da figura são apresentadas nas tabelas 1, 2, 3, e 4.

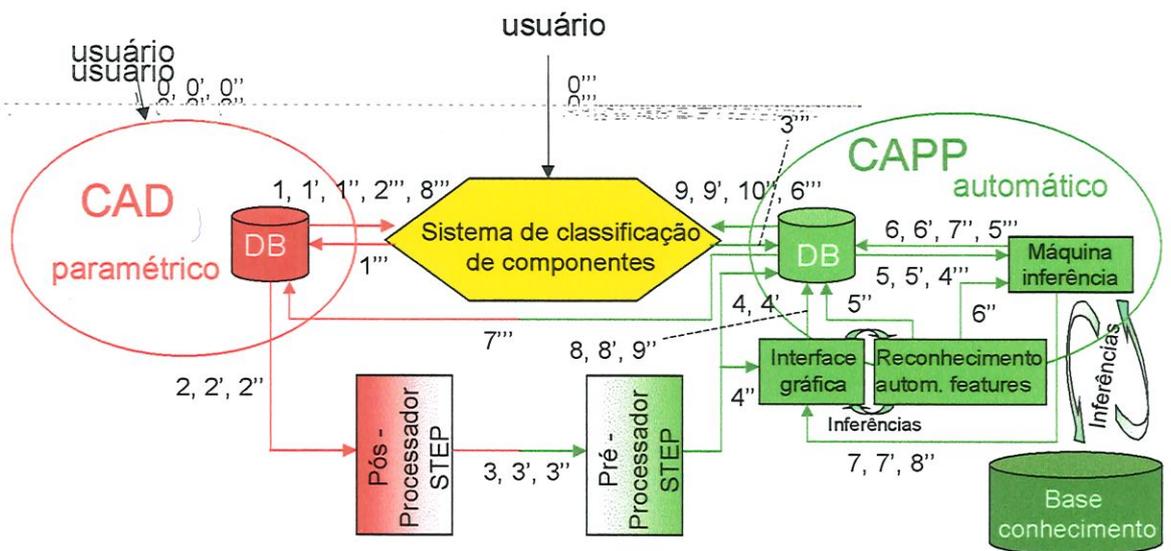


FIGURA 9: Esquema de um sistema CAD integrado a um CAPP generativo automático pela técnica de formatos neutros de interfaceamento (as legendas encontram-se nas tabelas 1, 2, 3, e 4)

TABELA 1: Legenda da FIGURA 9: dados comunicados quando a peça é radicalmente inovadora e o modelamento em CAD é baseado em features de manufatura

No.	Dados comunicados
0	Modelamento baseado em features de manufatura da nova peça pelo usuário
1	Arquivo do modelo da peça incluindo informações sobre features de forma de manufatura, parâmetros, dados gráficos, tecnológicos de precisão, de material, estrutura do produto, etc.
2	Features de manufatura no formato específico do CAD
3	Features de manufatura no formato STEP
4	Features de manufatura no formato específico do CAPP
5	Features de manufatura no formato específico do CAPP
6	Resultados de planejamento de processo: roteiros de operações e sub-operações, listas de objetos, etc.
7	Variáveis com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), para a geração automática dos croquis das operações na interface gráfica do CAPP
8	Arquivo dos croquis das operações da peça
9	Planos de processo da peça: roteiros de operações e sub-operações, croquis das operações, listas de objetos, etc.

TABELA 2: Legenda da FIGURA 9: dados comunicados quando a peça é radicalmente inovadora o modelamento em CAD é baseado em features de projeto

No.	Dados comunicados
0'	Modelamento baseado em features de projeto da nova peça pelo engenheiro
1'	Arquivo do modelo da peça incluindo informações sobre features de forma de projeto, parâmetros, dados gráficos, tecnológicos de precisão, de material, estrutura do produto, etc.
2'	Features de projeto no formato específico do CAD
3'	Features de projeto no formato STEP
4'	Features de projeto no formato específico do CAPP
5'	Features de projeto no formato específico do CAPP
6'	Resultados de planejamento de processo: roteiros de operações e sub-operações, listas de objetos, etc.
7'	Variáveis com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), para a geração automática dos croquis das operações na interface gráfica do CAPP
8'	Arquivo dos croquis das operações da peça
9'	Planos de processo da peça: roteiros de operações e sub-operações, croquis das operações, listas de objetos, features de manufatura, etc.

TABELA 3: Legenda da FIGURA 9: dados comunicados quando a peça é radicalmente inovadora e o modelamento em CAD não é baseado em features

No.	Dados comunicados
0"	Modelamento geométrico da nova peça (neste caso não é baseado em features)
1"	Arquivo do modelo da peça incluindo informações sobre dados gráficos, tecnológicos de precisão, de material, estrutura do produto, etc.
2"	Dados gráficos no formato específico do CAD
3"	Dados gráficos no formato STEP
4"	Dados gráficos no formato específico da interface gráfica do CAPP
5"	Features de manufatura no formato específico do CAPP, reconhecidos automaticamente
6"	Features de manufatura no formato específico do CAPP
7"	Resultados de planejamento de processo: roteiros de operações e sub-operações, listas de objetos, etc.
8"	Variáveis com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), para a geração automática dos croquis das operações na interface gráfica do CAPP
9"	Arquivo dos croquis das operações da peça
10"	Planos de processo da peça: roteiros de operações e sub-operações, croquis das operações, listas de objetos, features de manufatura, etc.

**TABELA 4: Legenda da FIGURA 9: dados comunicados quando a peça é paramétrica
(o modelamento não é necessário)**

No.	Dados comunicados
0'''	Cadastro das novas peças paramétricas pelo usuário: a peça e os valores dos parâmetros já classificados por features
1'''	Parâmetros das peças para a regeneração automática de seus desenhos no CAD
2'''	Arquivo do modelo paramétrico da peça regenerado automaticamente, incluindo informações sobre features de forma de projeto ou manufatura, parâmetros, dados gráficos, tecnológicos de precisão, de material, estrutura do produto, etc.
3'''	Parâmetros da peça para o CAPP
4'''	Parâmetros da peça
5'''	Resultados de planejamento de processo: roteiros de operações e sub-operações, parâmetros com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), listas de objetos, etc.
6'''	Planos de processo da peça: roteiros de operações e sub-operações, listas de objetos, etc.
7'''	Parâmetros com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), para a regeneração automática dos croquis das operações no CAD paramétrico
8'''	Arquivo dos croquis das operações da peça regenerado automaticamente.

São descritas primeiramente as formas de uso para o caso em que o novo produto apresenta peças com formas radicalmente inovadoras, e em seguida para o caso em que apresenta peças que podem ser parametrizadas.

3.1 Caso 1: o produto apresenta peças com formas radicalmente inovadoras

O texto que segue pode ser acompanhado na FIGURA 9 e TABELAS 1, 2, e 3.

Neste caso, na fase de projeto *detalhado* ou *paramétrico*, o projetista detalha as formas das peças advindas da fase de projeto de *corporificação* ou *layout*. Ele utiliza um modelador sólido paramétrico baseado em features em que o modelo é construído com a incorporação de features de forma de projeto ou features de forma de manufatura paramétricos e as dimensões exatas não precisam ser estabelecidas à priori. Depois do modelo paramétrico estar pronto obedecendo aos requisitos das fases anteriores, ele chega às

dimensões otimizadas, com o auxílio de sistemas CAE. O arquivo deste modelo da nova peça contendo as informações sobre os features de forma de projeto ou de manufatura (dependendo se o projeto for baseado em features de projeto ou de manufatura), parâmetros, dados gráficos, tecnológicos de precisão, de material, localização na estrutura do produto, etc., é então armazenado no sistema de gerenciamento de dados do produto, ou no próprio classificador de componentes (acompanhar na FIGURA 9 e TABELA 1). Como o sistema CAD possui um pós-processador para o formato neutro STEP, os dados do modelo da peça criados no CAD pelo projetista são convertidos para esse formato. O sistema CAPP automático deve possuir um pré-processador que traduza esses dados para os formatos internos em que o sistema trabalha para inferir os resultados de planejamento de processo. Se o projeto for baseado em features de forma de manufatura, esses dados vindos do CAD podem ser features de manufatura com suas dimensões, tolerâncias, rugosidades, etc. O sistema CAPP generativo automático (que pode ser um sistema especialista) com base nesses dados de entrada realiza inferências sobre seus conhecimentos representados em sua base de conhecimento e apresenta como saída resultados de planejamento de processo, como roteiros de operações e sub-operações, escolha de máquinas, ferramentas, etc., automaticamente, que são armazenados em sua base de dados. Também apresenta como resultados variáveis com os valores das dimensões de fabricação (dimensões em bruto, intermediárias, e finais), para a geração automática dos croquis das operações na interface gráfica do CAPP, através da simulação gráfica das operações macro sobre o feature representante do *blank*. Os arquivos dos croquis são armazenados na base de dados do CAPP, e, juntamente com os outros resultados de planejamento de processo, formam o plano de processo da nova peça. Este plano é então armazenado no classificador de componentes e anexado à nova peça.

Se o projeto for baseado em features de forma de projeto no CAD (FIGURA 9 e TABELA 2), o processo é o mesmo do descrito no parágrafo anterior mas a máquina de inferência deve traduzir a semântica dos features de forma de projeto vindos do arquivo STEP na de features de forma de manufatura, o que é difícil por não haver uma relação lógica determinística entre os dois. Esse processo também é realizado através da inferência sobre a base de conhecimento. Com os features de forma de manufatura o CAPP gera os resultados de planejamento de processo como no caso anterior e armazena o plano de processo anexado à nova peça no classificador de componentes.

Se o projeto não for baseado em feature (acompanhar na FIGURA 9 e TABELA 3), o pós-processador do CAD traduz o modelo gráfico e outras informações que foram modeladas pelo projetista para o formato neutro STEP. A interface gráfica do CAPP possui um pré-processador para traduzir o arquivo gráfico STEP em seu próprio formato gráfico. O

módulo de reconhecimento automático de features reconhece os features de forma de manufatura nos dados gráficos (o que é mais difícil que no caso apresentado no parágrafo anterior). Esses features em um formato familiar ao CAPP são utilizados para a inferência dos resultados de planejamento de processo. Esses resultados, incluindo os croquis das operações gerados pela interface gráfica do CAPP, são armazenados anexados à peça no classificador de componentes, como nos casos anteriores.

O sistema de classificação de componentes, integrado ao CAD e ao CAPP, permite a classificação da peça e a sua localização na estrutura de produto (esta última pode vir também do CAD), além do cadastro de seus dados e parâmetros. Os planos de processo das novas peças podem ser armazenados nesse sistema.

A integração CAD-CAPP, neste caso realizada pela técnica de formatos neutros de interfaceamento, também pode ser realizada por compartilhamento de objetos distribuídos (ex. CORBA, COM-OLE), mas nesse caso os sistemas devem ser compatíveis com esse tipo de integração.

3.2 Caso 2: o produto apresenta peças que podem ser parametrizadas

O texto que segue pode ser acompanhado na FIGURA 9 e TABELA 4.

Para as novas peças que podem ser parametrizadas, ou seja, para os tipos de peças paramétricas que têm maior probabilidade de serem requisitadas, o projetista já pode deixar construídos modelos paramétricos em CAD. Com muitos modelos paramétricos existentes, a nova peça provavelmente já terá um modelo reservado para ela e com os mesmos features, onde só mudam as dimensões ou os valores dos parâmetros. Quando chega o pedido de uma nova peça, esta é classificada em uma família ou em uma sub-classificação sua no sistema de classificação, e o usuário preenche os valores dos parâmetros da peça, que são parâmetros da família ou da sub-classificação. Assim uma família ou sub-classificação possuem os mesmos features e parâmetros para facilitar a integração com o CAD paramétrico, porque um modelo paramétrico pode representar todas as peças que possuem os mesmos features e parâmetros. Isso permite que apenas um modelo esteja associado a uma (sub-) classificação. Reconhecida a família, esse sistema de classificação solicita o desenho automático da peça chamando o modelo paramétrico já existente para a família e enviando os valores dos parâmetros para o CAD. Após editado, o arquivo do desenho da peça é armazenado no sistema de classificação anexado à peça. Como o sistema de classificação está integrado ao CAD paramétrico e

também ao CAPP automático, ele envia os parâmetros também ao CAPP, que os utiliza para a geração dos resultados de planejamento de processo. Nesse caso é necessário um trabalho de preparação e sistematização no CAPP viabilizando o planejamento variante paramétrico. Essa preparação e sistematização são necessárias a menos que o CAPP seja um generativo genérico ou um sistema especialista, o que seria muito caro, trabalhoso, difícil de desenvolver e às vezes menos preciso para este caso. Os resultados de planejamento de processo são então armazenados no sistema de classificação anexados à peça. Para a geração automática dos croquis das operações no CAD (ilustrações de chão-de-fábrica) pode-se proceder analogamente ao desenho da peça deixando-se construídos os modelos paramétricos em CAD dos croquis das operações padrão. Os valores de seus parâmetros (que são os parâmetros das operações), controlados por fórmulas e regras no CAPP, são enviados do CAPP ao CAD. Editados os croquis das operações, estes são armazenados no plano de processo anexado à peça no sistema de classificação.

Pode-se perceber que tanto no primeiro caso como no segundo os features são de maior importância como uma representação de parte da peça, necessária à integração CAD-CAPP.

Observa-se que os formatos neutros como o STEP para a comunicação e integração de dados são de grande importância para os desenvolvedores de softwares de CAPP, pois têm o potencial de direcionar e focar suas pesquisas entre esse padrão internacional (STEP) e os seus sistemas. Se desenvolverem sistemas CAPP que geram resultados de planejamento de processo automaticamente a partir dos features de forma de manufatura no formato STEP, deram um grande passo no problema de desenvolver um sistema CAPP generativo automático e integrado geral e compatível com qualquer sistema CAD, se o projeto for baseado em features de manufatura.

A análise da dúvida entre se projetar por features de projeto ou de manufatura é muito relativa. Se há muitas máquinas boas disponíveis e o custo não é prioritário e sim qualidade (indústria espacial), deve-se deixar a liberdade ao projetista fazer o melhor possível sem restrições, projetando com features de projeto, a menos que conheça bem tanto a área de projeto como a de manufatura. Se houver restrições, o que é a maioria dos casos, deve-se analisar estrategicamente a preferência ou por qualidade, incluindo investimentos em equipamentos, que possibilitassem um retorno financeiro depois, ou por pouco menos qualidade e menor custo. Nesse caso pode-se limitar os features disponíveis na biblioteca do CAD aos mais adequados à situação da empresa específica, visando enxugar a proliferação de variações nos projetos e adequar às condições de manufatura.

O trabalho desenvolvido descrito no capítulo 4 seguinte encaixa-se no contexto do texto apresentado acima, mas apenas para o caso em que o produto apresenta peças que podem ser parametrizadas.

4 DESENVOLVIMENTO DE UMA SOLUÇÃO CAD/CAPP INTEGRADA VISANDO O PLANEJAMENTO DE PROCESSO AUTOMÁTICO DE PEÇAS PARAMÉTRICAS

O desenvolvimento da solução foi efetuado com base no método adotado, que está descrito na introdução (item 1.5). Assim, o primeiro passo é a *identificação do problema e objetivo*.

4.1 Identificação do problema e objetivo

A Introdução e os itens 1.1 e 1.2 levantam, após a importância da integração de sistemas CAD e CAPP no desenvolvimento de produto, toda a problemática envolvida e relacionada, mostrando o motivo de alguns problemas em sistemas existentes e discute alguns objetivos a serem alcançados para uma solução a estes problemas. É discutida, tecnicamente, financeiramente, e mercadologicamente, a viabilidade da aplicação de um sistema CAD e CAPP integrado apenas com peças paramétricas. Também foram levantadas as vantagens do uso de pacotes de software de aplicação comerciais como alternativa de estratégia para a construção e desenvolvimento de soluções integradas em organizações.

Assim, a introdução levanta a importância de um projeto que tem o objetivo de desenvolver uma solução CAD e CAPP integrada, apenas para peças paramétricas, utilizando softwares de aplicação já disponíveis no mercado, para oferecer um apoio à fase de detalhamento do processo de desenvolvimento de produto, especificamente às atividades

correlatas a projeto detalhado e planejamento do processo de fabricação. Esse projeto é o escopo deste trabalho.

O estudo realizado nesta etapa também foi utilizado para determinar alguns dos requisitos (ou funções) para o sistema. Esses requisitos também têm base no contexto apresentado no capítulo anterior no caso de peças paramétricas.

Também aqui foram planejadas as atividades ou as etapas seguintes.

4.2 Identificação dos requisitos

Neste item são identificados os requisitos a que a solução deve obedecer.

Definido o objetivo do desenvolvimento, é necessário aqui definir as funções principais ou os requisitos macro da solução, que podem ser levantados a partir da necessidade das atividades de projeto detalhado e de planejamento de processo, e com base na viabilidade de serem realizados no caso de peças paramétricas, discutida no item 1.2 da introdução e no capítulo 3. Os requisitos macro são:

- Geração automática do desenho da nova peça paramétrica;
- Geração automática do seu plano de processo macro;
- Geração automática do plano de sub-operações;
- Geração automática dos croquis de fabricação das operações macro.

Então se torna necessário identificar os requisitos mais detalhados. Estes foram divididos nas categorias de otimização do processo e de otimização do gerenciamento de dados.

Para uma otimização do processo, que seria o de execução das atividades e manipulação do sistema, seria necessário que a entrada dos dados de representação das peças no sistema, ou seja, os parâmetros, fosse feita uma única vez, economizando tempo e trabalho sem valor, além de se evitar erros na digitação, que levam a inconsistências. Maior automação do fluxo de informação de outras atividades ajudaria a otimizar o processo, oferecendo todos os benefícios que uma integração de sistemas pode oferecer. Também seria ideal que as funções do sistema fossem automáticas, com resultados rápidos, precisos, e em consonância com os recursos e outras atividades da empresa. Também seria necessário um mínimo de pessoas para a realização de todas as funções, se possível uma apenas, que teria uma visão integrada de todo o processo. Isso otimizaria o fluxo de trabalho e de informação, e também o tempo perdido com isso.

Considerando a otimização do gerenciamento de dados, os parâmetros das peças teriam que garantir consistência e integridade com os outros dados seus, de seu produto correspondente e dos resultados de planejamento, que são gerados no CAD e no CAPP. Armazenamento, exclusão, recuperação e manipulação dos dados teriam que ser possíveis sem comprometer a consistência e integridade com os outros.

Assim, os requisitos identificados são, resumidamente e de uma forma pontual, do ponto de vista de *otimização do processo*:

1. Geração automática do desenho da nova peça paramétrica (função);
2. Geração automática do plano de processo macro (função);
3. Geração automática do plano de sub-operações (função);
4. Geração automática dos croquis de fabricação das operações macro (função);
5. Entrada dos dados de representação das peças (digitação dos parâmetros) uma única vez no sistema;
6. Automação do fluxo de informação (dados);
7. Permitir o planejamento de processo customizado para uma empresa específica;
8. Um mínimo de pessoas para a manipulação do sistema e realização de todas suas funções. De preferência uma apenas, que tenha uma visão integrada do processo envolvido.

Do ponto de vista do *gerenciamento de dados*:

9. Consistência e integridade dos parâmetros das peças com outros dados seus, do seu produto correspondente e com os resultados de planejamento, seja no CAD ou no CAPP;
10. Possibilidade de armazenamento, recuperação, exclusão e manipulação de dados, sem comprometer a consistência e integridade com os outros;
11. Oferecer segurança dos dados;
12. Trabalhar com padrões.

Os requisitos levantados servem para um direcionamento das decisões a serem tomadas nas etapas seguintes.

4.3 Esquematização da solução

Para o desenho do esquema do sistema de modo que este cumpra seus requisitos de uma maneira viável, é necessário antes entender seu contexto no desenvolvimento de

produto e se ter uma visão por processos. O capítulo 3 apresenta de um modo geral o processo de uso de um sistema CAD/CAPP integrado no contexto do desenvolvimento de produto, contextualizando também o caso de uso com peças paramétricas, sendo portanto necessário a sua releitura para o acompanhamento da linha de raciocínio.

Para desenhar o esquema, é necessário identificar os componentes ou aplicativos necessários que permitem realizar suas funções.

De acordo com os requisitos identificados, a solução tem uma função de geração automática do desenho da nova peça paramétrica e de seus croquis de fabricação das suas operações macro. Para isso a solução necessita de um sistema CAD. Como as peças são paramétricas o mais viável é a utilização de um sistema CAD paramétrico, que permite regenerar um modelo parametrizado de forma automática a partir da atualização dos valores dos parâmetros. Isso dispensa a necessidade de programação para gerar automaticamente os desenhos.

Outra função da solução é a geração automática do plano de processo macro e de sub-operações. Para isso é necessário um sistema de planejamento de processo assistido por computador (CAPP).

De acordo com o apresentado no capítulo 3, é viável a utilização de um sistema de classificação de componentes (ou peças) para que este seja um gerenciador e servidor dos dados (ou parâmetros) para que os outros aplicativos possam realizar suas funções a partir desses dados. Isso possibilita que o requisito 5 seja satisfeito, garantindo também, dependendo das funcionalidades fornecidas pelo software adotado, a satisfação dos requisitos 9 e 10. Então, os valores atualizados dos parâmetros das peças podem ser digitados uma única vez pelo usuário diretamente no sistema de classificação de componentes, que é o servidor dos parâmetros para o CAD paramétrico criar os desenhos das novas peças e para o CAPP criar os planos de processo. A consistência e integridade dos parâmetros das peças com os parâmetros utilizados para a geração dos desenhos no CAD e para a geração dos planos de processo no CAPP são assim garantidas.

Com relação à geração dos croquis de fabricação, o CAPP é o servidor para o CAD dos parâmetros de saída resultantes do planejamento do processo, sendo necessário realizar a integração de parâmetros CAPP/CAD. A FIGURA 10 a seguir ilustra o esquema do sistema.

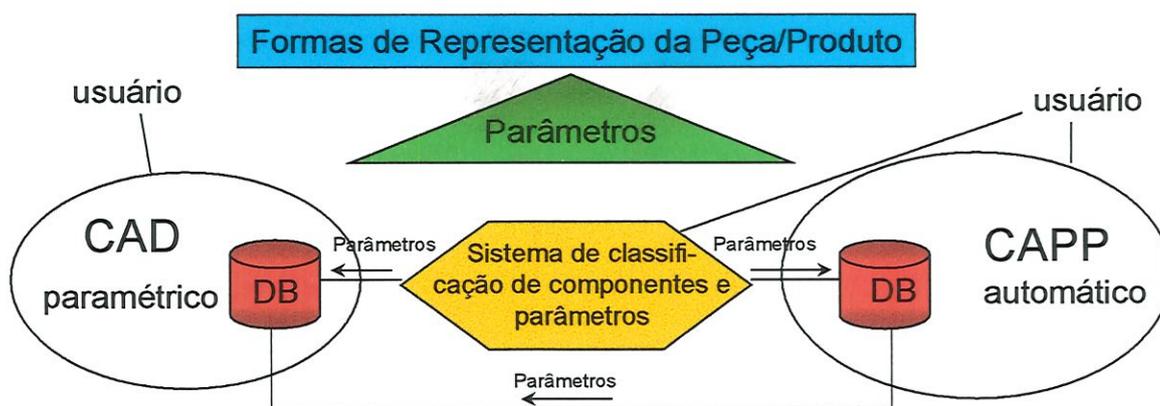


FIGURA 10: Esquema do sistema

Para uma integração com outras atividades do desenvolvimento de produto, o sistema de classificação de componentes pode também estar integrado com um sistema de estruturação de produto e/ou qualquer outro de gerenciamento de dados de produto, garantindo maior integração entre todos os dados correlatos ao produto. Mas isso foge do escopo deste trabalho.

4.4 Seleção dos softwares

Primeiramente os softwares comerciais devem ser escolhidos para que o esquema definido no item anterior possa ser realizado. As funcionalidades oferecidas pelos softwares devem ser comparadas com os requisitos da solução a ser desenvolvida. Selecionam-se os softwares cujas funcionalidades melhor encontrem esses requisitos (LAUDON, K. & LAUDON, J., 1998). Mas outros critérios também devem afetar a escolha. Esses critérios podem ser fatores econômicos, aplicabilidade em indústrias, flexibilidade, e outros.

De acordo com o esquema da solução definido no item anterior, é necessário adotar um software CAD paramétrico. Selecionou-se o Mechanical Desktop (MDT) da Autodesk, e os seguintes motivos levaram a essa escolha:

- Este software permite a realização das funções relativas à criação dos desenhos, tanto da nova peça paramétrica como de seus croquis de fabricação das suas operações macro. A criação é automática (requisitos 1 e 4) por ser um software paramétrico e pelo fato da solução lidar apenas com peças paramétricas;

- É totalmente compatível com o AutoCAD, que é um software CAD já muito difundido e aplicado em muitas indústrias de manufatura. Isso facilita com que estas indústrias adotem a solução desenvolvida;
- Permite uma customização através de *saídas do usuário*, que são lugares no código do programa em que clientes podem sair do processamento realizado pelos programas do software e chamar outros módulos ou programas de software escritos por eles para suas funções únicas de processamento (LAUDON, K. & LAUDON, J., 1998) (requisito 7);
- É viável economicamente perante outros softwares CAD paramétricos;
- É de fácil manipulação.

Para a função de criar o plano de processo de forma automática para peças paramétricas (requisitos 2 e 3), o sistema CAPP comercial deve permitir o *planejamento de processo variante paramétrico* (ver Revisão Bibliográfica- item 2.7.3.2, Método variante). Esse é um método de planejamento em que os planos de processo podem ser elaborados apenas em função dos parâmetros, pois toma como base um plano padrão parametrizado. Esse método também é considerado como um planejamento automático, pois os planos possuem regras associadas a cada tipo de operação, exigindo uma sistematização na definição das regras (ROZENFELD, 1992).

Assim não é necessário adquirir um sistema caro e complexo de inteligência artificial (baseado em conhecimento) para a geração dos planos. Para garantir um planejamento de processo customizado (requisito 7), o CAPP deve permitir o cálculo automático de algumas tarefas determinísticas de acordo com dados e padrões específicos das empresas, e dar liberdade ao usuário na elaboração das regras e fórmulas, que são adequadas a cada empresa.

Adotou-se o software comercial CAPPE da KSR como o sistema CAPP para a solução. Os seguintes motivos levaram a essa escolha:

- Permite realizar o planejamento variante paramétrico (automático) no caso de operações macro (requisito 2);
- É aberto e flexível para a execução das tarefas de planejamento, fornecendo uma assistência em um planejamento de processo customizado (requisito 7), pois permite o cálculo automático para a realização de algumas tarefas determinísticas de planejamento de processo de acordo com dados e padrões específicos das empresas, dando liberdade ao usuário na elaboração das regras e fórmulas;

- É um sistema modular, e disponibiliza um módulo específico para o sistema de classificação de componentes, requerido pelo esquema da solução definido na etapa anterior;
- Os módulos são integrados e possuem uma base de dados única, assim, o sistema de classificação de componentes é integrado com o módulo relativo ao planejamento de processo automático, e isso dispensa a realização dessa integração requerida pelo esquema (requisitos 5, 6, 8, 9, 10, 12);
- Possui um sistema comercial de gerenciamento de base de dados relacional de grande qualidade. Isso garante a manipulação, integração e relacionamentos entre variáveis, objetos, parâmetros, fórmulas e regras cadastrados pelo usuário (requisitos 9, 10, 11, 12).
- Permite a comunicação de parâmetros a outro aplicativo via a facilidade DDE do Windows (ver item 4.6.1.2).

Com o esquema definido e também os softwares do qual fazem parte, é necessário conformar os requisitos e adaptá-los às características dos softwares.

4.5 Adaptação dos requisitos às características dos softwares

Os requisitos 1 (função), 4 (função), e 7 podem ser cumpridos pelas funcionalidades do software CAD adotado (Mechanical Desktop- MDT), como mencionado no item anterior (4.4).

Os requisitos 2 (função), 5, 6, 7, 8, 9 (adaptado), 10, 11, e 12 podem ser cumpridos pelo software CAPP adotado (CAPPE), como mencionado no item anterior.

O CAPPE permite a geração automática do plano de processo macro através do planejamento variante paramétrico, mas não permite a geração automática do plano de sub-operações, assim o requisito 3 atualmente ainda não pode ser atendido pelas funcionalidades do CAPPE.

O requisito 9: “consistência e integridade dos parâmetros das peças com outros dados seus, do seu produto correspondente, e com os resultados de planejamento, seja no CAD ou no CAPP”, deve ser adaptado. O CAPPE permite a consistência e integridade dos parâmetros das peças com outros dados em seus módulos, pois estes módulos são integrados a uma base única de dados. Assim não garantem necessariamente a ligação dos parâmetros das peças com outros possíveis dados relacionados a elas e ao seu produto correspondente. Mas sim com os resultados de planejamento de processo gerados no CAPP. Os desenhos de

produto e resultados de planejamento de processo (croquis de fabricação) gerados no CAD podem estar consistentes e integrados com os parâmetros das peças, mas para isso é necessário, além de realizar a integração do sistema de classificação de componentes e do CAPP automático com o CAD, preparar os modelos paramétricos com seus parâmetros consistentes aos desses módulos do CAPPE. E isso pode ser feito.

Assim, o requisito 9 é adaptado a: “Consistência e integridade dos parâmetros das peças com os resultados de planejamento, tanto no CAD como no CAPP.”

Os requisitos foram pouco adaptados. Mesmo assim este item está incluído no trabalho para que este siga o método delineado (ou os passos) para o desenvolvimento da solução.

Com os projetos de integração de dados e de preparação e customização dos softwares, que são descritos nas duas etapas seguintes, o sistema é especificado de modo a permitir o cumprimento dos requisitos adaptados aqui.

4.6 Projeto de integração de dados entre os softwares

Com os softwares selecionados, o esquema da FIGURA 10 passa a ter a terminologia da FIGURA 11 seguinte:

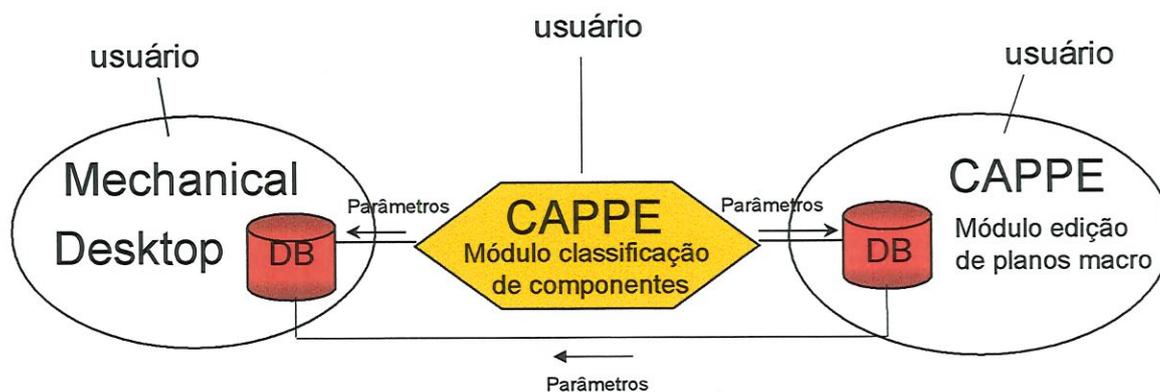


FIGURA 11: Esquema do sistema com os softwares comerciais

De acordo com o esquema, é necessário estudar a integração entre:

1. O módulo para classificação de componentes (CLASSCOM) do CAPPE e o Mechanical Desktop (MDT)

2. O módulo para edição de planos macro (Editor de Planos Macro) do CAPPE e o Mechanical Desktop (MDT).

O projeto de integração entre o CLASSCOM e o Editor de Planos Macro não é necessário, pois como mencionado estes módulos já vêm integrados no pacote do CAPPE.

4.6.1 Projeto de integração entre o CLASSCOM e o MDT

Foram levantadas duas alternativas para este projeto de integração: uma é via uma planilha *excel* da Microsoft (contendo os parâmetros) integrada aos dois sistemas; e outra é via transferência de dados por *Dynamic Data Exchange* (DDE), ou Troca Dinâmica de Dados.

4.6.1.1 Planilha *excel* integrada

Esta alternativa foi levantada porque o MDT já vem integrado com o *excel*, onde se pode cadastrar os novos valores dos parâmetros do correspondente modelo parametrizado, para depois regenerá-lo automaticamente no MDT.

Este projeto de integração seguiria o esquema a seguir (FIGURA 12):

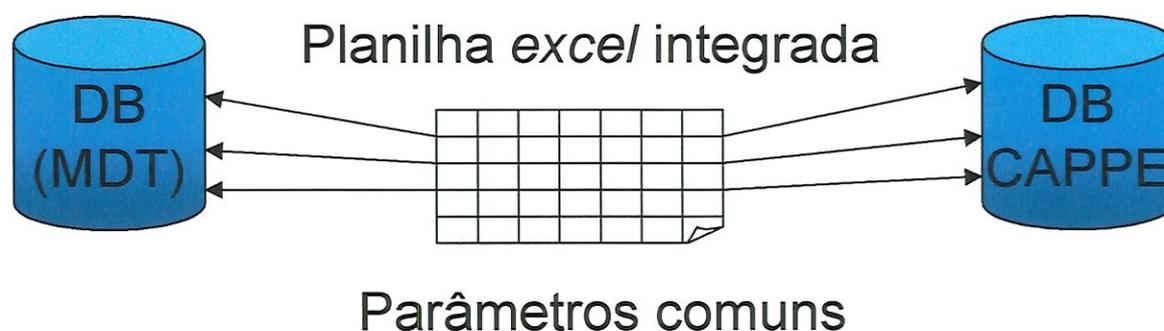


FIGURA 12: Esquema para integração via planilha *excel* comum aos dois sistemas

Assim, deve-se realizar o projeto de integração da planilha *excel* com a base de dados única do CAPPE. O processo sistemático seria o seguinte:

- Cadastra-se os novos valores dos parâmetros da peça no CLASSCOM;
- Aciona-se o comando para o cadastramento automático dos parâmetros na planilha comum (arquivo *excel*) via integração da base de dados do CAPPE com a planilha;

- Aciona-se o comando no MDT para a regeneração automática do modelo parametrizado da peça com as dimensões correspondentes aos valores da planilha integrada.

Uma outra alternativa para o projeto de integração é via comunicação de dados entre os softwares diretamente por *Dynamic Data Exchange* (DDE).

4.6.1.2 Integração por *Dynamic Data Exchange* (DDE)

Esta alternativa foi levantada porque o CAPPE é programado para um trabalho de implementação da integração customizada por DDE.

O DDE é uma facilidade da Microsoft para permitir a intercomunicação entre aplicativos, operando no ambiente Windows. A troca de dados é feita através do compartilhamento de memória. Opera com base na arquitetura cliente/servidor com a comunicação feita através da DDEML (*Dynamic Data Exchange Management Library*). O aplicativo cliente invoca o aplicativo servidor enviando-lhe os comandos e dados necessários à sua execução. O aplicativo servidor processa os comandos e dados recebidos e retorna os resultados ao cliente (TIBERTI, 1996).

O projeto de integração segue o processo sistemático ilustrado na FIGURA 13 a seguir:

No CLASSCOM:

- Abrir o MDT (o arquivo do modelo paramétrico correspondente)
- Enviar os parâmetros ao MDT via DDE, após comando de cancelar qualquer processo em andamento no MDT

No MDT:

Envia comandos via DDE ao MDT para:

- Cancelar qualquer processo em andamento no MDT
- Criar um arquivo texto contendo a lista dos parâmetros com seus valores
- Importar os parâmetros com seus valores do arquivo texto criado atribuindo-os aos parâmetros do modelo paramétrico
- Regenerar automaticamente o modelo atualizado

FIGURA 13: Processo sistemático para integração via DDE

Os comandos para a execução dos três últimos itens podem ser encapsulados em um programa em linguagem LISP (o MDT aceita esta linguagem). Assim, os comandos vindos do CLASSCOM podem ser resumidos em:

- Abrir o MDT (arquivo do modelo paramétrico correspondente);
- Enviar os parâmetros ao MDT via DDE, após o comando de cancelar qualquer processo em andamento no MDT.

Envia comandos via DDE ao MDT para:

- Cancelar qualquer processo em andamento no MDT;
- Carregar no MDT o programa em linguagem LISP;
- Executar o programa em LISP.

Entre as duas alternativas levantadas para o projeto de integração entre o CLASSCOM e o MDT, ou seja, entre a integração via uma planilha excel integrada ou via transferência de dados através da facilidade DDE, escolheu-se a segunda. O grau de trabalho e dificuldade envolvidos seriam semelhantes, mas empregando-se a segunda alternativa, todo o processo para a geração do desenho da peça seria realizado automaticamente apertando-se somente um *click* do mouse no CLASSCOM (CAPPE).

Este último foi então o projeto de sistematização da integração entre o CLASSCOM e o MDT.

A seguir é descrito o projeto de sistematização da integração entre o módulo Editor de Planos Macro do CAPPE e o MDT, necessário para tornar o sistema de acordo com o esquema da FIGURA 11. Esta sistematização possibilitará a geração automática no MDT dos croquis de fabricação das operações macro a partir dos parâmetros correspondentes às dimensões de fabricação das operações vindos do módulo Editor de Planos Macro, calculados automaticamente no CAPPE.

4.6.2 Projeto de integração entre o Editor de Planos Macro e o MDT

Os detalhes das operações no módulo Editor de Planos Macro do CAPPE também vêm preparados para um trabalho de customização e sistematização visando a transferência via DDE dos parâmetros das operações para um sistema CAD, para a geração dos croquis e outras ilustrações de manufatura. Assim, o projeto de sistematização foi bem semelhante ao do item anterior.

A mudança em relação à sistematização descrita no item anterior é que os três últimos comandos, que eram enviados do CLASSCOM ao MDT via DDE, aqui terão que ser

executados no MDT, porque o Editor de Planos Macro não está programado para enviá-los via DDE. Apenas os parâmetros podem ser enviados. Para isso acontecer seria necessário mexer em sua programação interna, o que não foi possível.

Então a sistematização pode ser feita incorporando-se um comando no menu do MDT (ver item 4.7.5). Esse comando do menu puxa aqueles três últimos comandos necessários para regenerar os croquis a partir dos parâmetros enviados via DDE, que são:

- Cancelar qualquer processo em andamento no MDT;
- Carregar o programa em linguagem LISP no MDT;
- Executar o programa em LISP.

Observa-se que aqui ainda é necessário adicionar no programa LISP uma pequena rotina para criar uma *string* com a seqüência dos nomes dos parâmetros. Essa *string* é necessária para a importação dos parâmetros pelo MDT. O módulo Editor de Planos Macro não está programado para enviar essa *string* para o MDT via DDE, apenas o CLASSCOM.

4.7 Projeto de preparação e customização dos softwares

A seguir é descrito o projeto de preparação e customização dos softwares. Isso é necessário para o funcionamento e sincronização dos componentes da solução.

4.7.1 Preenchimento da base de dados básica do CAPPE e definição dos relacionamentos

Os dados no CAPPE são gerenciados por um sistema de gerenciamento de base de dados relacional (*relational DBMS*), utilizados e manipulados pelo sistema de uma forma padronizada. A edição dos resultados de planejamento de processo, que como descrito na revisão bibliográfica deste trabalho consome o maior tempo no planejamento, é realizada pelo sistema utilizando os próprios dados da empresa cadastrados na base de dados. Isso garante a padronização dos resultados de planejamento, proporcionando maior organização e consistência dos documentos.

Assim, é necessário preencher a base de dados básica do CAPPE antes de manipulá-lo. O preenchimento envolve o cadastro de variáveis, parâmetros, features, fórmulas, operações, regras, máquinas, dispositivos de fixação, ferramentas, instrumentos de medição, sub-operações, classes de recursos e outras entidades que vierem a ser necessárias.

Depois de cadastrados, é necessário definir os relacionamentos entre os dados e definir as classificações dos dados. Isso permite maior facilidade em sua seleção pelo usuário, pois restringe as possibilidades de escolha oferecidas pelo sistema.

4.7.2 Preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças

Para o trabalho de preparação do CAPPE visando o cadastro/classificação das peças, realizam-se os seguintes procedimentos:

1. Cadastro da nova família;
2. Cadastro dos nomes, símbolos, descrição, tipo e unidades dos parâmetros da família, classificando-os por *features* (neste caso, ou seja, na aplicação no CAPPE, os *features* servem apenas como uma classificação de parâmetros, e não necessariamente têm uma semântica em engenharia);
3. Cadastro da peça padrão.

Define-se uma família para o tipo de peça paramétrica de interesse (engrenagem, eixo, etc.), cadastra-se os nomes, símbolos, descrição, tipo e unidades dos parâmetros da família, classificando-os por *features* para uma melhor organização. Os seus valores não são necessários. Sempre que se for cadastrar uma nova peça pertencente a essa família, o sistema apresenta uma ficha sua onde o usuário apenas preenche os valores dos parâmetros. Insere-se uma nova peça na família, definindo-a como a peça padrão representante da família e preenchem-se os valores de seus parâmetros.

4.7.3 Preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro

Para a elaboração do plano de processo macro automaticamente no CAPPE, torna-se necessário realizar os seguintes procedimentos:

1. Cadastro das operações macro padrão da família;
2. Cadastro das regras que definem a permanência das operações macro padrão no plano de processo macro das novas peças;
3. Cadastro das fórmulas para os tempos das operações;
4. Atribuição das regras e fórmulas às correspondentes operações.

As operações macro padrão da família são o conjunto de todas as operações necessárias a todas as possíveis peças paramétricas do tipo em questão, porque no

planejamento variante paramétrico são retiradas as operações que não são necessárias. Esse tipo de planejamento de processo utiliza regras que tomam essa decisão em função dos valores dos parâmetros e da sua existência. No CAPPE essa sistematização pode ser feita, automatizando o planejamento macro.

Ao elaborar as regras que definem se uma operação sai do plano de processo macro da peça em questão é preciso o conhecimento técnico e heurístico em planejamento de processo. As regras devem ser elaboradas considerando-se os recursos de manufatura e a problemática específica da empresa ou instituição.

A elaboração das fórmulas que calculam os tempos de fabricação de cada operação macro também pode ser feita em função dos parâmetros. Observa-se que como os parâmetros definem totalmente as características das peças paramétricas, inclusive a sua geometria de forma completa, todas as tarefas determinísticas de planejamento de processo podem ser efetuadas em função dos parâmetros. As fórmulas utilizadas para os cálculos podem ser elaboradas de acordo com os critérios da empresa/instituição específica.

Após elaborar as regras e as fórmulas e cadastrá-las no CAPPE (módulo Gerenciador de Fórmulas), associa-se essas às operações correspondentes. Com isso o CAPPE torna-se preparado para gerar o plano macro de forma automática.

4.7.4 Preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT

Para possibilitar a integração do CAPPE com o MDT para a edição automática dos desenhos parametrizados, é necessário, além do projeto de integração descrito nos itens 4.6.1 e 4.6.2, fazer algumas configurações específicas no módulo para a configuração do CAPPE (Configurador do Ambiente). Essas configurações servem tanto para a edição do desenho da peça como para a edição dos croquis das operações no MDT.

Além disso, para a edição do desenho de produto (das peças), é necessário entrar com o nome do arquivo do modelo paramétrico do MDT na ficha da peça padrão no CLASSCOM.

Para a edição dos croquis das operações no MDT é necessário enviar via DDE para o MDT os parâmetros das operações macro localizados no Editor de Planos Macro. Esses parâmetros são os correspondentes às dimensões em bruto, intermediárias e dimensões finais. É necessário anexar esses parâmetros às operações macro correspondentes, pois são parâmetros delas.

Os parâmetros das dimensões em bruto e intermediárias são resultados de fórmulas (que calculam o sobremetal e somam as dimensões finais, ou o subtraem destas) e então

devem ser ligados às suas fórmulas correspondentes no módulo para o gerenciamento de fórmulas do CAPPE (Gerenciador de Fórmulas) para o seu cálculo automático.

Os parâmetros das dimensões finais não são resultados de nenhum processamento, porque são os dados (parâmetros) de entrada pelo usuário. Esses parâmetros, assim como os das dimensões em bruto e intermediárias, devem estar localizados no Editor de Planos Macro como os parâmetros das operações, para serem integrados com o MDT para a geração dos croquis de fabricação. Para satisfazer o requisito proposto inicialmente de digitação dos dados de entrada uma única vez pelo usuário (requisito 5), torna-se necessário ligar os parâmetros das dimensões finais de fabricação das operações aos parâmetros entrados pelo usuário no CLASSCOM. Isso é feito ligando-se uma fórmula que é igual ao parâmetro de entrada pelo usuário (as fórmulas são funções de variáveis do sistema) ao parâmetro da dimensão final da operação.

4.7.5 Preparação do MDT para a edição automática dos desenhos

Em um sistema CAD paramétrico é possível construir um modelo 3D paramétrico, ou seja, com vários tipos de restrições geométricas (paralelismos, concentricidades, etc.) e dimensionais (valores numéricos, parâmetros, ou equações representando as dimensões). Essas restrições, embora pareçam trabalhosas durante o modelamento, fazem com que haja uma “amarração” entre as entidades topológicas em função de parâmetros. Mudando-se os valores dos parâmetros, mudam-se as dimensões do modelo, através de uma regeneração automática no CAD. Isso permite uma flexibilidade do modelo, mantendo-se as restrições entre as entidades.

Assim peças paramétricas podem ser regeneradas automaticamente no CAD a partir de seu modelo paramétrico correspondente construído através de um trabalho de modelamento com restrições.

O MDT deve gerar os desenhos das novas peças paramétricas e também os croquis de fabricação. Então na preparação do MDT para os desenhos das peças deve-se elaborar um modelo CAD paramétrico que corresponda a todas as peças paramétricas de uma mesma família (ou classificação) considerada. Para isso a família (ou classificação) deve ser definida de modo que possa ser possível a construção de um só modelo CAD paramétrico que possa regenerar todas as peças da família. Observa-se que muitos sistemas CAD paramétricos comerciais permitem a parametrização da supressão de features locais em um mesmo modelo.

Para os desenhos dos croquis de fabricação deve-se elaborar um modelo CAD paramétrico que corresponda aos croquis de uma mesma operação macro.

Para que o projeto de integração CAPPE-MDT se realize é necessário que os nomes dos parâmetros do modelo no MDT sejam exatamente iguais aos nomes dos parâmetros correspondentes no CAPPE.

A customização do menu do MDT, necessária para o projeto de integração descrito no item 4.6.2, é feita adicionando-se no menu do MDT um comando que aciona os três necessários para regenerar os croquis a partir dos parâmetros enviados via DDE. Esses três comandos são, de acordo com o item 4.6.2:

- Cancelar qualquer processo em andamento no MDT;
- Carregar o programa em linguagem LISP no MDT;
- Executar o programa em LISP.

Isso é feito através de uma pequena alteração no *script* para o menu do MDT, onde se inserem esses comandos. O arquivo do *script* encontra-se no diretório do MDT.

Com o projeto de integração de dados e de customização dos softwares realizados, pode-se definir a sistemática operacional da solução. Com isso, as funções especificadas anteriormente podem ser comprovadas por meio da sistematização. Como mencionado na descrição do método na introdução deste trabalho, em uma empresa a sistemática operacional vai redesenhar os seus procedimentos organizacionais, daí a importância das etapas realizadas até aqui, que direcionam a etapa seguinte.

4.8 Especificação da sistemática de operação

A sistemática operacional da solução são os procedimentos para o usuário manipular o sistema para que cumpra com seus objetivos. Para a solução integrada, a sistemática operacional é a seguinte:

1. Cadastrar a nova peça paramétrica classificando-a na família de sua correspondente peça padrão (CLASSCOM- CAPPE);
2. Preencher todos os valores de seus parâmetros (parâmetros de entrada), digitar o nome do arquivo do desenho paramétrico da peça, e mandar editar seu desenho automaticamente, tudo na ficha da peça em questão no CLASSCOM- CAPPE (com isso o MDT é aberto e o desenho é regenerado automaticamente);
3. Salvar o desenho após a sua edição e imprimi-lo (MDT);

4. Abrir um novo plano de processo anexando-o à nova peça correspondente e mandar criar seu plano de processo macro automaticamente (seqüência de operações, tempos) (Editor de Planos Macro- CAPPE);
5. Selecionar as máquinas para as operações macro (as possibilidades de seleção são restringidas apenas às máquinas vinculadas com a operação em questão) (Editor de Planos Macro- CAPPE);
6. Salvar o plano de processo macro e imprimi-lo (Editor de Planos Macro- CAPPE);
7. Selecionar os dispositivos de fixação (escolha restringida) como um detalhamento da primeira operação (Editor de Planos Macro- CAPPE);
8. Selecionar as ferramentas de usinagem (escolha restringida) como um detalhamento da primeira operação;
9. Selecionar os instrumentos de medição (escolha restringida) como um detalhamento da primeira operação;
10. Salvar o plano de processo macro e imprimir a lista de componentes para a primeira operação (Editor de Planos Macro- CAPPE);
11. Abrir a lista dos detalhamentos da primeira operação macro e mandar editar o seu croqui de fabricação (Editor de Planos Macro- CAPPE) (com isso o MDT é aberto automaticamente);
12. Mandar regenerar o croqui automaticamente acionando o comando correspondente no menu customizado (MDT);
13. Salvar o croqui após a sua edição e imprimi-lo (MDT);
14. Repetir a partir da seqüência 7 (sete) em diante mas considerando as operações macro seguintes.

Com isso tem-se impresso e em formatos eletrônicos os seguintes resultados de projeto detalhado e planejamento de processo:

- O desenho técnico mecânico da nova peça paramétrica;
- O seu plano de processo macro;
- As listas de componentes (dispositivos de fixação, ferramentas de usinagem, e instrumentos de medição) para todas as operações macro;
- Os croquis de fabricação para todas as operações macro.

A partir de então é possível começar um trabalho de aplicação da solução ou exemplo prático, onde é feita a preparação do sistema para um tipo de peça paramétrica

exemplo. Isso permite a concretização das funções da solução e o seu real funcionamento para o tipo de peça para o qual o sistema é preparado.

4.9 Aplicação prática

O projeto desenvolvido teve uma aplicação prática no Laboratório de Sistematização e Integração da Manufatura da Fábrica Integrada Modelo (FIM), na sede do Núcleo de Manufatura Avançada (NUMA), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A aplicação foi organizada realizando-se as etapas seguintes:

- Escolha do escopo de peças paramétricas exemplo;
- Levantamento dos dados necessários para a preparação da aplicação;
- Preparação da aplicação.

Os itens seguintes descrevem a realização dessas etapas.

4.9.1 Escolha do escopo de peças paramétricas exemplo

A FIGURA 14 a seguir apresenta uma visão das etapas realizadas na escolha do escopo de peças paramétricas exemplo para esta primeira aplicação.

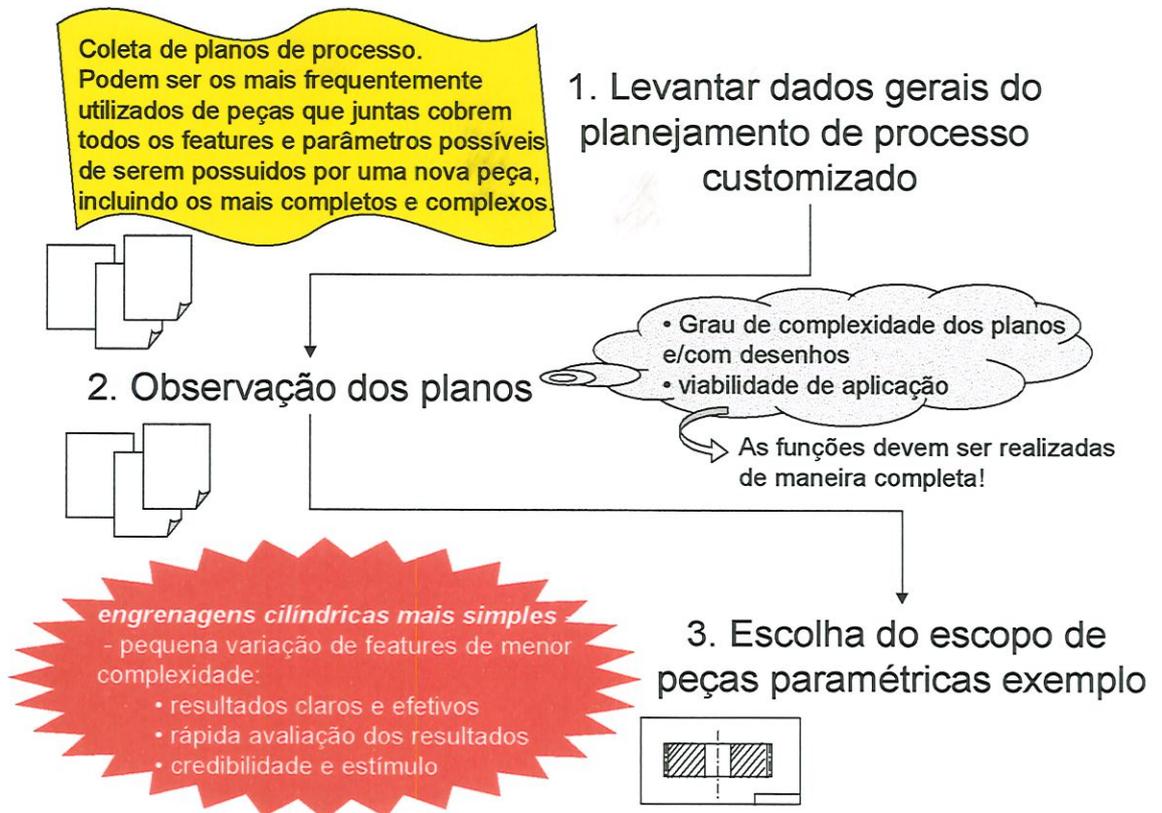


FIGURA 14: Etapas para a escolha do escopo de peças paramétricas exemplo

Primeiramente levantaram-se os dados gerais do planejamento de processo na FIM, que pode ser resumido à coleta dos planos de processo mais frequentemente utilizados de peças que juntas cobrem todos os features e parâmetros possíveis de serem possuídos por uma nova peça. Incluíram-se também os planos das peças mais completas e complexas.

A FIM fabrica várias famílias de engrenagens e foram observados os respectivos planos de processo e desenhos a fim de observar o grau de complexidade junto com a viabilidade de serem incluídos nesta primeira aplicação.

Seria necessário selecionar o escopo de peças para o sistema suportar de modo que a operação da solução e as funções detalhadas possam ser realizadas de maneira completa.

Foram selecionadas como escopo as *engrenagens cilíndricas mais simples* em que há pequena variação de features entre elas e esses são de menor complexidade. Isso permite a obtenção de resultados claros e efetivos mais rapidamente, e também uma rápida avaliação dos primeiros resultados, a fim de se obter credibilidade e estímulo nesta primeira aplicação, que são importantes.

4.9.2 Levantamento dos dados necessários para a preparação da aplicação

Este item está organizado apresentando os seguintes tópicos: análise dos desenhos de produto e planos de processo, definição dos parâmetros de entrada e features, e por última a definição dos parâmetros de saída, fórmulas, regras, operações, e outros recursos.

4.9.2.1 Análise dos desenhos de produto e planos de processo

Analisaram-se os planos de processo e desenhos de produto de peças que juntas cobrem todos os features e parâmetros contidos no escopo delimitado (engrenagens cilíndricas simples). Analisaram-se atentamente os desenhos dessas peças, os features existentes, os parâmetros envolvidos, os planos macro de operações, os croquis de fabricação, as listas de componentes utilizados, e a partir daí começou-se o levantamento detalhado dos parâmetros que podem definir ou descrever totalmente a peça final com suas especificações geométricas e tecnológicas, ou seja, os **parâmetros de entrada ou parâmetros de produto**.

4.9.2.2 Definição dos parâmetros de entrada e features

Os valores dos parâmetros de entrada no sistema são por definição os únicos a serem preenchidos pelo usuário na ficha da nova peça, todo o trabalho restante é efetuado automaticamente pelo sistema em função deles. Então foi reservado um maior tempo e dada uma especial atenção, dos pontos de vista conceitual e prático, à coleta e definição desses parâmetros a fim de se evitar problemas depois. Esses parâmetros, para viabilizar a integração com o MDT, devem ser iguais aos parâmetros a serem utilizados no modelamento paramétrico. Definiram-se os parâmetros de acordo com a possibilidade mais viável de edição dos desenhos de produto e adequação às fórmulas e regras que os utilizam.

Os parâmetros de entrada são classificados por **features**. Neste caso, os features apenas têm essa função, e não necessariamente possuem semântica em engenharia (manufatura ou projeto), mas esta foi considerada como uma orientação para a sua definição, para uma maior coerência e para que os parâmetros sejam mais facilmente identificados.

Todos os features existentes no escopo de peças possuem seus parâmetros únicos. No CLASSCOM um parâmetro pertence a apenas um feature, e um feature pode possuir várias instâncias do mesmo parâmetro, por exemplo o *diâmetro* do *furo 1* e o do *furo 2*. No caso o feature é *furo* e o parâmetro *diâmetro* pode ter a instância *1*, *2*, ou mais, dependendo de qual furo da peça ele se refere.



Como exemplos de parâmetros definiram-se dimensões nominais, dimensões superiores e inferiores, números de dentes de engrenagem, e outros. Como exemplos de features definiram-se *furo*, *rasgo de chaveta*, *canal de óleo*, e outros.

A FIGURA 15 seguinte ilustra resumidamente a definição dos parâmetros de entrada e features após a análise dos planos de processo e desenhos de produto.

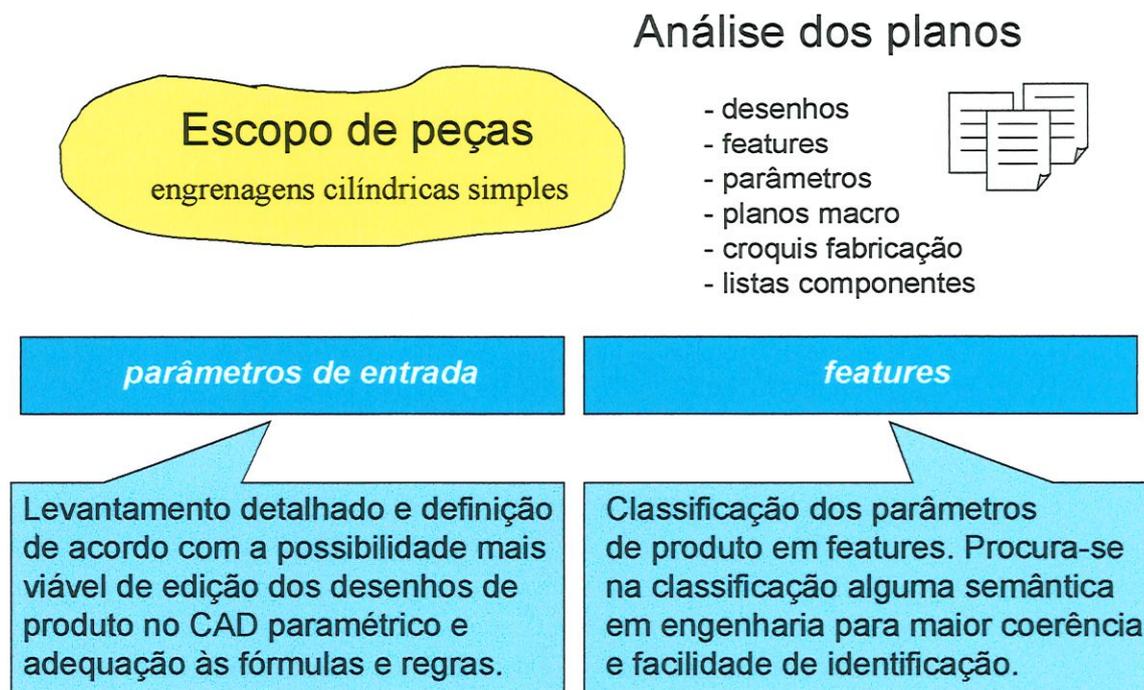
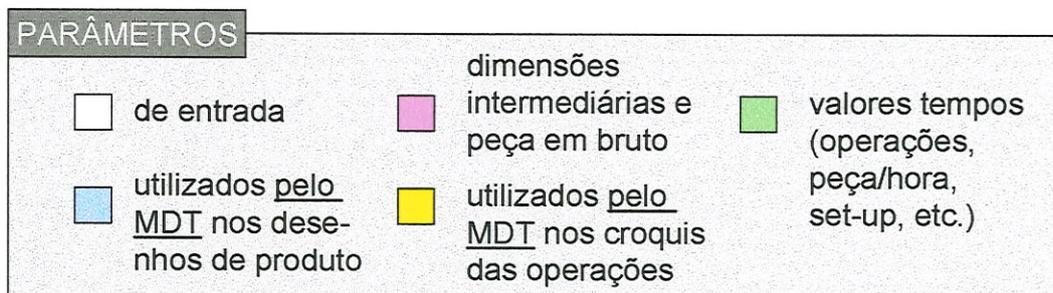
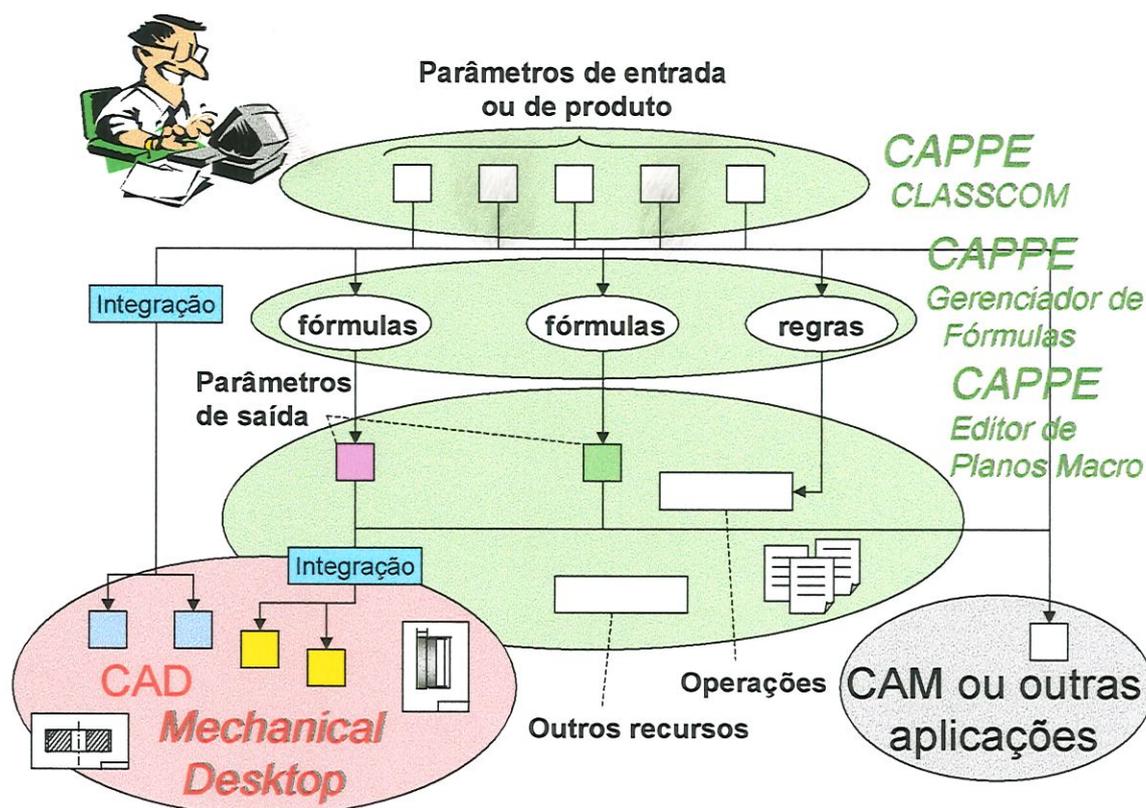


FIGURA 15: Definição dos parâmetros de entrada e features

4.9.2.3 Definição dos parâmetros de saída, fórmulas, regras, operações, e outros recursos

A FIGURA 16 abaixo apresenta o esquema ilustrando a sistemática da solução, para um melhor entendimento de quais tipos de dados são necessários levantar e definir, além dos parâmetros de entrada classificados por features já discutidos.



Torna-se necessária a definição de:

- ✓ Parâmetros de saída
- ✓ Fórmulas
- ✓ Regras
- ✓ Operações
- ✓ Outros recursos

FIGURA 16: Sistemática da solução e os dados necessários para a sua preparação

O processo sistemático é o seguinte: Uma vez cadastrados os valores dos parâmetros de entrada pelo usuário (acompanhar o texto na FIGURA 16 acima), estes são utilizados em

fórmulas e regras pela solução para a geração automática dos resultados de suas funções. As regras determinam a permanência ou retirada das operações padrão no plano macro. Os resultados do processamento das fórmulas são atribuídos a outros parâmetros para que possam ser utilizados em outras finalidades. Neste caso, são utilizados na geração dos croquis das operações no CAD e na determinação dos tempos das operações do plano macro. Um sistema CAM também pode, em uma outra aplicação, receber os valores desses parâmetros através de integração para realizar suas funções de planejamento de processo, como por exemplo a determinação do caminho da ferramenta e do programa CN. Esses parâmetros, por serem resultados de algum processamento e por poderem ser reutilizados em outras aplicações, são os **parâmetros de saída**.

No caso os parâmetros de saída levantados utilizados para a geração dos croquis das operações são as dimensões em bruto, as dimensões intermediárias de fabricação, e algumas dimensões finais. Esses parâmetros devem ser definidos com cuidado, porque devem ser iguais aos parâmetros a serem utilizados na construção do modelo paramétrico no MDT, e os croquis editados devem ter a mesma forma de cotação daqueles dos planos de processo analisados.

Para o cálculo dessas dimensões em bruto e intermediárias, é necessário o levantamento das **fórmulas** correspondentes, encapsulando nelas o cálculo dos sobremetais. Em uma empresa é preciso discutir com seus processistas como eles calculam o sobremetal. Aqui foram levantadas as fórmulas e regras para o seu cálculo. Por exemplo para o feature *furo* o sobremetal do torneamento de desbaste é 2,5 mm a menos no raio, do torneamento de acabamento é 2 vezes o raio da pastilha (ferramenta de torneamento) a menos no raio, e o da retífica é 0,3 mm a menos no raio. Portanto a fórmula para o *diâmetro do furo em bruto* é $\{\text{diâmetro do furo nominal final} - 2 \cdot [2,5 + (2 \cdot \text{raio da pastilha}) + 0,3]\}$. O parâmetro de saída *diâmetro do furo em bruto* é assim utilizado na edição automática do croqui da operação que utiliza essa dimensão, lembrando que também pode ser utilizado pelo CAM.

Os parâmetros de saída levantados relacionados aos tempos das operações são os correspondentes aos tempos de processamento das máquinas, aos tempos de setup e ao número de peças processadas por hora.

Para o cálculo desses tempos foram levantadas as correspondentes **fórmulas**. Em um trabalho de implantação em empresa, observa-se como ela realiza esses cálculos e a partir daí elaboram-se as fórmulas.

Para a criação automática do plano macro é necessária a elaboração do plano padrão ou base. Analisando-se os planos de processo macro correspondentes ao escopo de peças selecionado descreveu-se o plano padrão com todas as **operações** existentes em todos esses

planos. A seqüência das operações deve ser cuidadosamente definida através de um trabalho interativo com a definição das regras, de modo que a sistemática do planejamento variante paramétrico (automático) possa gerar os planos macro para quaisquer possibilidades de novas peças que pertencem ao escopo da aplicação, incluindo peças em que a seqüência de algumas mesmas operações é diferente. Isso requer a repetição de seqüências iguais no mesmo plano padrão, associadas a regras diferentes. Na definição das regras foi observado o que leva uma operação a permanecer ou retirar-se do plano base em função dos parâmetros de entrada. Num trabalho de implantação da solução em uma empresa, para que o conhecimento em planejamento de processo obedeça à sua “cultura”, é imprescindível a consulta a seus processistas. Montaram-se regras do tipo: “Se ..., a operação fica” ou “Se ..., a operação sai”.

Além das operações, como **outros recursos** foram levantados dos planos de processo as máquinas, os dispositivos de fixação, as ferramentas, e os instrumentos de medição. Também foram definidas as classes desses recursos.

Foram definidos todos os parâmetros a serem utilizados no modelamento paramétrico no MDT dos desenhos das peças e dos croquis das operações (iguais aos correspondentes parâmetros de entrada ou saída).

Tudo o que foi levantado e definido neste item 4.9.2 foi posteriormente cadastrado na solução durante a sua atividade de preparação.

4.9.3 Preparação da aplicação

A atividade de preparação permite a utilização da solução para as peças paramétricas para as quais o sistema é preparado, no caso *engrenagens cilíndricas simples*. Se houver interesse em utilizar a solução para um outro tipo de peça paramétrica, por exemplo eixos, é necessário um trabalho de preparação semelhante a este, no caso de eixos.

O trabalho de preparação consiste nas atividades ilustradas na FIGURA 17:

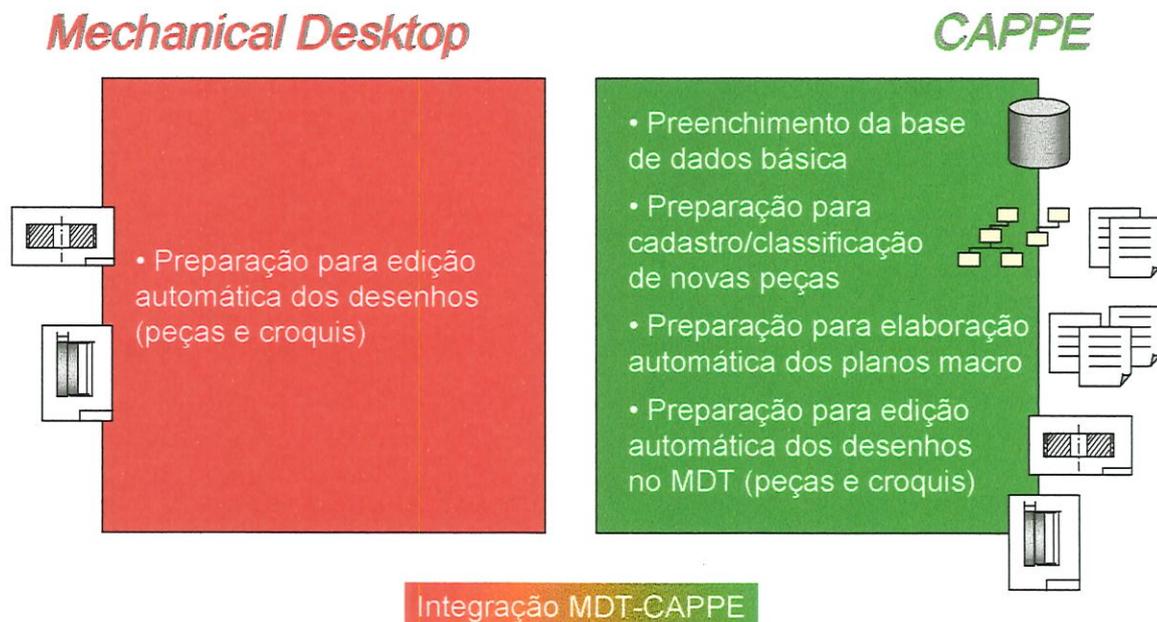


FIGURA 17: Atividades de preparação da aplicação

As atividades que se referenciam neste item são:

- Preenchimento da base de dados básica do CAPPE;
- Preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças;
- Preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro;
- Preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT;
- Preparação do MDT para a edição automática dos desenhos;
- Integração MDT-CAPPE.

4.9.3.1 Preenchimento da base de dados básica do CAPPE e definição dos relacionamentos

A primeira coisa a ser feita é zerar a base de dados do CAPPE.

Cadastraram-se todos os parâmetros de entrada e os de saída no Dicionário de Variáveis, módulo do CAPPE que lida com todas as variáveis do sistema.

Os features foram cadastrados no CLASSCOM, anexando a eles os seus respectivos parâmetros de entrada.

Também foram cadastradas as fórmulas e regras levantadas no Gerenciador de Fórmulas, módulo do CAPPE para o gerenciamento das fórmulas e regras.

Como recursos foram cadastrados todas as operações, máquinas, dispositivos de fixação, ferramentas, e instrumentos de medição, sub-classificando cada tipo de recurso no Gerenciador de Recursos de Planejamento, módulo do CAPPE para o gerenciamento dos recursos. As fontes foram os planos de processo das peças do escopo adotado.

Os relacionamentos entre os recursos são necessários para haver uma amarração entre as classificações dos recursos de um tipo e as classificações dos recursos de outro. Por exemplo *torneamento* é um recurso do tipo *operação macro* e é classificado em *torneamento de desbaste*, *de acabamento*, e *duro*. *Pastilha* é um recurso do tipo *ferramenta* e é classificada em *pastilha para desbaste*, *para acabamento*, e *para torneamento duro*. Para a amarração das classificações é necessário por exemplo o relacionamento entre *torneamento de desbaste* com *pastilha para desbaste*, *torneamento de acabamento* com *pastilha para acabamento*, e assim por diante.

Com isso os dados principais foram preenchidos. Isso elimina a necessidade de digitação pelo usuário dos dados básicos relacionados aos recursos, podendo apenas selecioná-los de uma classificação. Quando for necessário por exemplo a escolha de uma máquina para uma operação, é necessário selecioná-la apenas dentre as máquinas disponíveis para tal operação.

A FIGURA 18 resume os procedimentos necessários para o preenchimento da base de dados básica do CAPPE.

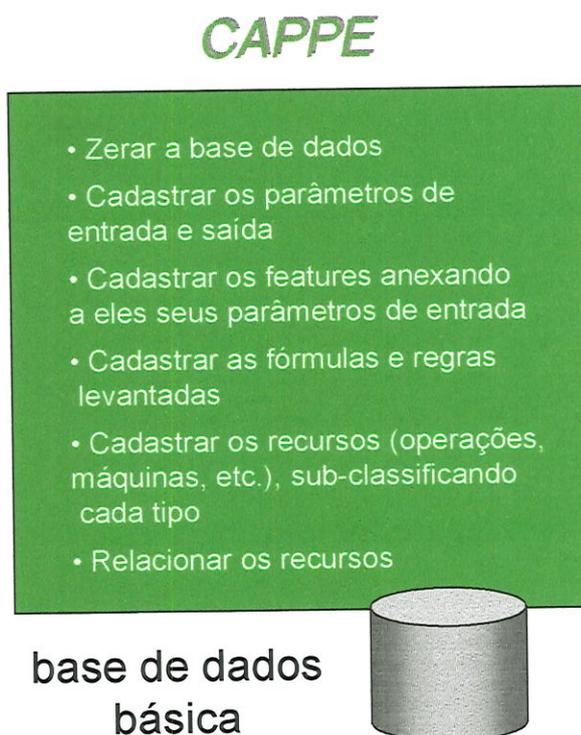


FIGURA 18: Procedimentos para o preenchimento da base de dados básica do CAPPE

4.9.3.2 Preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças

Preenchida a base de dados básica, definiu-se uma família para *engrenagens cilíndricas simples* no CLASSCOM.

Os features com seus parâmetros foram anexados à família.

Uma nova engrenagem foi cadastrada na família e foram preenchidos os valores de seus parâmetros de entrada. Essa engrenagem foi considerada como a padrão da família.

A FIGURA 19 a seguir resume esses procedimentos.

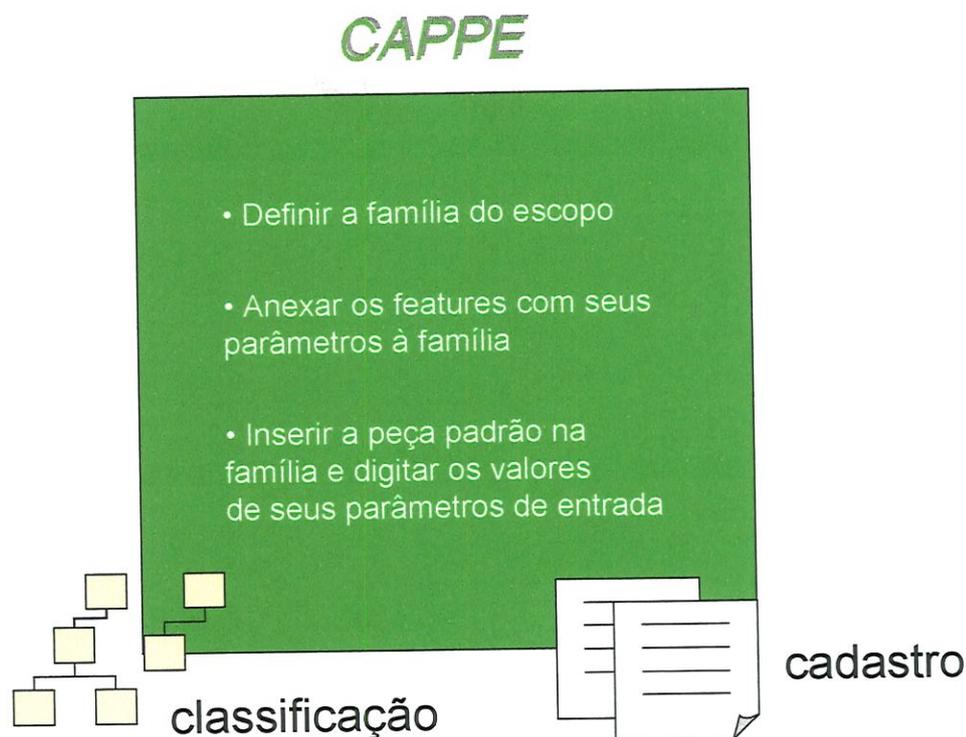


FIGURA 19: Procedimentos de preparação do CAPPE para o cadastro/classificação de novas peças

4.9.3.3 Preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro

Nesta etapa primeiramente é necessário elaborar o plano de processo base para o planejamento variante paramétrico. Para isso abriu-se um novo plano de processo tipo *representante de família* anexando-o à engrenagem padrão no módulo Editor de Planos Macro do CAPPE.

Selecionaram-se todas as operações macro existentes no escopo na seqüência adequada ao efeito das regras (ver a definição da seqüência das operações no final do item 4.9.2.3). Apenas nas operações variantes, ou seja, nas que têm a possibilidade de serem retiradas do plano, associaram-se as regras correspondentes que permitem essa tomada de decisão em função de parâmetros ou outras variáveis do sistema.

Associaram-se às operações macro as correspondentes máquinas e fórmulas dos tempos. As máquinas, fórmulas e regras já estavam cadastradas na base de dados, assim foi necessário apenas selecioná-las.

A FIGURA 20 resume esses procedimentos.

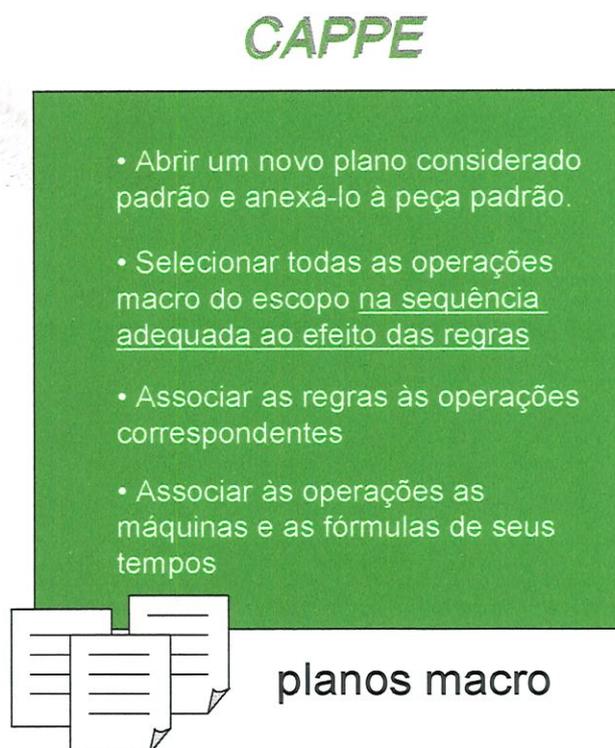


FIGURA 20: Procedimentos de preparação do CAPPE para a elaboração automática dos planos macro

4.9.3.4 Preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT

A preparação do CAPPE foi realizada para a edição do desenho da engrenagem e também para a edição dos croquis das operações.

Para a edição automática do desenho da nova engrenagem no MDT com os valores dos parâmetros do CLASSCOM (através da integração CLASSCOM-MDT), foram feitas algumas configurações específicas necessárias no Configurador do Ambiente, módulo para a configuração do CAPPE. Também se digitou o nome do arquivo do modelo paramétrico da engrenagem na ficha da engrenagem padrão no CLASSCOM.

As configurações realizadas servem também para a integração entre o Editor de Planos Macro e o MDT para a edição automática dos croquis das operações.

Como as fórmulas e os parâmetros das operações, que são parâmetros de saída (pois são resultados de fórmulas) já foram levantados e cadastrados (respectivamente nos módulos Gerenciador de Fórmulas e Dicionário de Variáveis), aqui se anexaram os parâmetros das operações às operações correspondentes, para depois associar as fórmulas aos parâmetros correspondentes. Os parâmetros das operações tais que são também dimensões finais da peça

(parâmetros de entrada) são associados a fórmulas que são funções iguais aos parâmetros de entrada correspondentes.

Isso torna o CAPPE preparado para a edição dos desenhos no MDT.

O resumo desses procedimentos é apresentado na FIGURA 21.

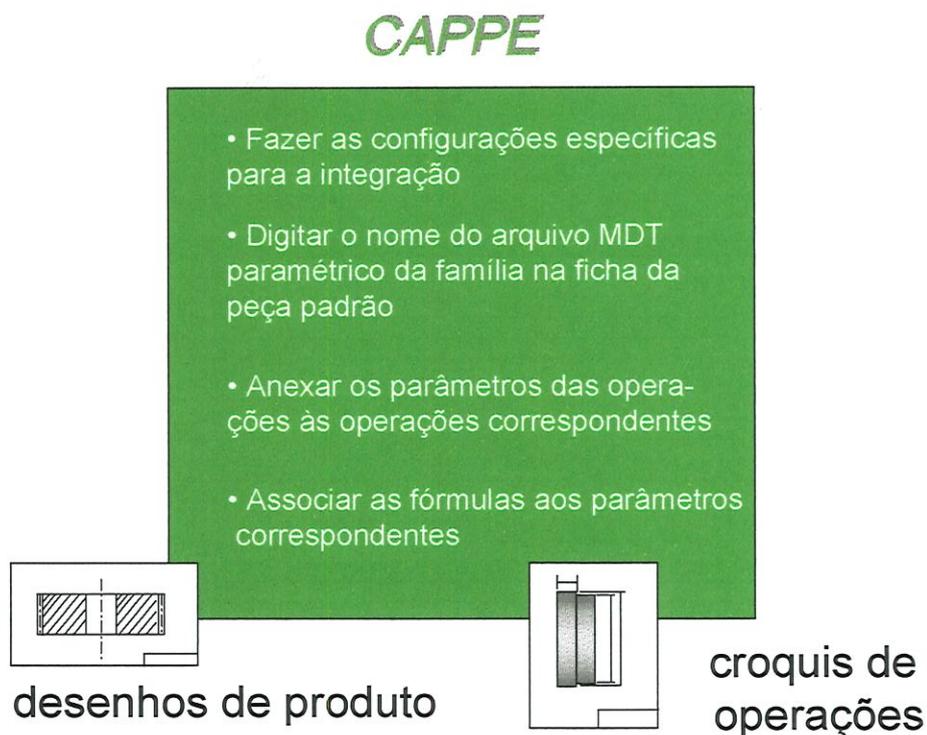


FIGURA 21: Procedimentos de preparação do CAPPE para a edição automática dos desenhos no MDT

4.9.3.5 Preparação do MDT para a edição automática dos desenhos

A função do MDT é regenerar automaticamente o desenho final da nova engrenagem com as suas dimensões e também os croquis de chão-de-fábrica com as suas dimensões de fabricação.

Para isso foi realizado o modelamento sólido paramétrico da engrenagem (3D) no MDT. Os parâmetros utilizados no modelamento foram os mesmos parâmetros de entrada no CLASSCOM (dimensões finais), e seus nomes foram exatamente iguais, para que a integração ocorra corretamente e a peça seja regenerada. Isso também permite a satisfação do requisito 9 adaptado (item 4.5).

Para a edição dos croquis de fabricação da engrenagem foram criados seus modelos 3D paramétricos. Utilizaram-se para isso parâmetros com os mesmos nomes dos parâmetros das operações macro do Editor de Planos Macro do CAPPE.

Por serem modelos sólidos, tanto o desenho da engrenagem como seus croquis de chão-de-fábrica puderam ser editados nas vistas principais e em perspectiva.

Foi realizada a customização do menu do MDT de acordo com o projeto de customização descrito no item 4.7.5, para viabilizar a integração com o Editor de Planos Macro do CAPPE. Para isso inseriu-se no *script* do menu o comando que aciona os três outros necessários para regenerar os croquis com base nos parâmetros enviados via DDE, que são: cancelar qualquer processo em andamento no MDT, carregar o programa em linguagem LISP, e executar o programa em LISP.

O resumo dos procedimentos de preparação do MDT é apresentado na FIGURA 22.

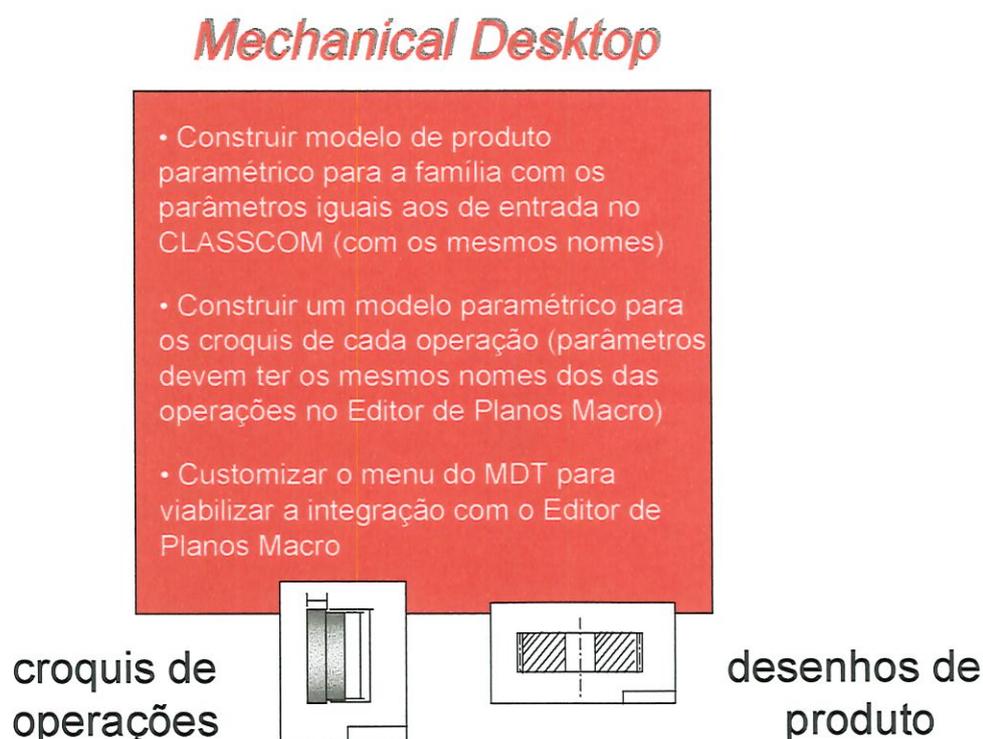


FIGURA 22: Procedimentos de preparação do MDT para a edição automática dos desenhos

4.9.3.6 Integração MDT-CAPPE

De acordo com o projeto de integração do item 4.6.1, criou-se o programa em linguagem LISP para executar os seguintes procedimentos:

- Criar um arquivo texto contendo a lista dos nomes dos parâmetros com os seus valores, vindos via DDE do CLASSCOM;

- Importar (o MDT) do arquivo texto criado os parâmetros com os seus valores, atribuindo-os aos parâmetros do modelo paramétrico no MDT;
- Regenerar automaticamente o modelo atualizado.

De acordo com o projeto de integração do item 4.6.2, como mencionado foi necessário adicionar a esse programa LISP, antes dos comandos para os procedimentos descritos acima, uma pequena rotina para criar uma *string* com a seqüência dos nomes dos parâmetros. Nesse caso o programa executa os procedimentos ordenados da seguinte maneira:

- Criar uma *string* com a seqüência dos nomes dos parâmetros;
- Criar um arquivo texto contendo a lista dos nomes dos parâmetros com os seus valores, vindos via DDE do CLASSCOM;
- Importar (o MDT) do arquivo texto criado os parâmetros com os seus valores, atribuindo-os aos parâmetros do modelo paramétrico no MDT;
- Regenerar automaticamente o modelo atualizado.

Esses dois programas foram deixados no diretório *raiz* do CAPPE.

A FIGURA 23 apresenta esses procedimentos.



FIGURA 23: Procedimentos para a efetivação da integração MDT-CAPPE

Assim a solução CAD-CAPP integrada para engrenagens cilíndricas simples encontra-se em funcionamento.

4.10 Verificação da aplicação

Os resultados foram gerados pela solução executando-se os procedimentos operacionais descritos no item 4.8. Os anexos A, B, C, e D apresentam, respectivamente, as telas apresentadas pela solução (no monitor de vídeo) do desenho em CAD da nova engrenagem cadastrada, do seu plano de processo macro, da lista dos dispositivos de fixação da operação macro de tornear, e do croqui da operação macro de tornear.

A verificação da aplicação da solução foi realizada através da observação dos seguintes fatores:

- Satisfação dos requisitos iniciais;
- Organização dos documentos apresentados;
- Qualidade e precisão dos resultados;
- Velocidade na geração dos resultados.

Satisfação dos requisitos iniciais:

Os requisitos iniciais foram adaptados no item 4.5. Todos os requisitos adaptados puderam ser cumpridos. Assim as limitações em relação aos requisitos iniciais são a diferença entre estes e os requisitos adaptados, e são, como mencionado no item 4.5:

- A função de geração automática do plano de sub-operações não pôde ser realizada;
- Não são garantidas a consistência e integridade dos parâmetros das peças com todos outros dados seus e do seu produto correspondente, mas sim com os desenhos de produto e os resultados de planejamento de processo no CAD e no CAPP.

Essas limitações não são muito significativas em relação aos benefícios oferecidos. Muitas empresas não trabalham com planos de sub-operações, e para estas a primeira limitação acima pode ser desconsiderada. A consistência e integridade dos parâmetros das peças com todos outros dados seus e de seu produto pode ser efetivada em um projeto futuro de integração da solução com um sistema mais abrangente, como por exemplo sistemas PDM e ERP.

Organização dos documentos apresentados:

Os documentos gerados são editados utilizando-se os próprios dados contidos na base de dados, e isso fez com que os resultados de planejamento fossem padronizados. O

formato dos documentos editados também obedece a um mesmo padrão oferecido pelos softwares comerciais. Com isso obteve-se documentos consistentes e organizados.

Qualidade e precisão dos resultados:

Como mencionado na Introdução (item 1.2) as peças paramétricas permitem que os resultados de seu planejamento de processo sejam bem estudados e controlados pelas empresas em função dos parâmetros que as representam completamente. Isso faz com que a maior parte desses resultados possa ser obtida através da sistematização determinística do planejamento. A solução desenvolvida permite essa sistematização através da utilização de regras e fórmulas. Uma limitação sua, portanto, é que não permite a geração de resultados não-determinísticos de planejamento de processo. A qualidade dos resultados da solução então, fora esta limitação, depende das regras e fórmulas elaboradas. Por isso deve-se levá-las de modo a representarem de uma maneira sistemática e completa todo aquele estudo e controle sobre os resultados de planejamento.

O escopo de engrenagens cilíndricas simples desta aplicação prática permitiu um determinismo do planejamento de processo o suficiente para que as regras e fórmulas agregassem boa qualidade e precisão aos planos gerados.

Velocidade na geração dos resultados:

A velocidade na geração dos resultados depende principalmente da quantidade de parâmetros, que depende do tipo e tamanho do escopo de peças para o qual a solução foi preparada. O maior tempo requerido devido à quantidade de parâmetros é o de digitação de seus valores pelo usuário no cadastro das novas peças. As funções da solução são automáticas, e isso ofereceu um tempo significativamente baixo de geração dos resultados.

A verificação foi observada apenas qualitativamente para que seja útil não apenas para o caso prático ou escopo de peças considerado, mas também para qualquer outro escopo em projetos de implementação em empresas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se neste trabalho o desenvolvimento de uma solução CAD-CAPP integrada para o uso com peças paramétricas, com o intuito de apoiar as atividades mais operacionais de detalhamento do desenvolvimento de produto relacionadas ao projeto detalhado e ao planejamento de processo. A solução contribui com as funções sistemáticas de geração automática do desenho de produto das novas peças paramétricas que vierem a ser cadastradas no sistema, na geração automática de seu plano de processo macro, e na geração automática dos croquis das operações macro como detalhamentos e ilustrações de chão-de-fábrica. Considerações a respeito da verificação da aplicação estão descritas no item 4.10, e pode-se considerar que foi bastante satisfatória no sentido de apoiar e otimizar as atividades correspondentes do desenvolvimento de produto.

Uma empresa que utiliza esta solução pode subseqüentemente selecionar um outro escopo ou família de peças paramétricas, e preparar a solução para o seu funcionamento. A grande importância da solução é que ela permite fazer um trabalho gradual de preparação para a ampliação do escopo de peças suportado, até se chegar em um alto diferencial de rendimento e produtividade das tarefas executadas para a maior parte das peças manufaturadas pela empresa.

Espera-se que as funcionalidades disponibilizadas pela solução possam ser empregadas nas indústrias para aproveitar todo o seu potencial de retorno, em termos de produtividade e conseqüentemente financeiramente. E que possam contribuir para liberar os processistas mais experientes das empresas às tarefas mais “nobres” e de mais alto nível, aproveitando melhor o seu tempo de trabalho.

Como futuras pesquisas, o campo está aberto para o desenvolvimento de outros trabalhos visando aumentar ainda mais o potencial das ferramentas CAD e CAPP e também contribuir com a Engenharia Simultânea. Trabalhos como a integração da solução desenvolvida com os sistemas correspondentes às atividades posteriores que se utilizam das

informações geradas pela solução e a fornecem o feedback dos resultados que foram obtidos dessas atividades posteriores a partir das informações recebidas, a fim de verificação da viabilidade da nova peça paramétrica cadastrada em termos de restrições encontradas na manufatura, e o seu imediato reprojetado, com o objetivo de ganhar tempo.

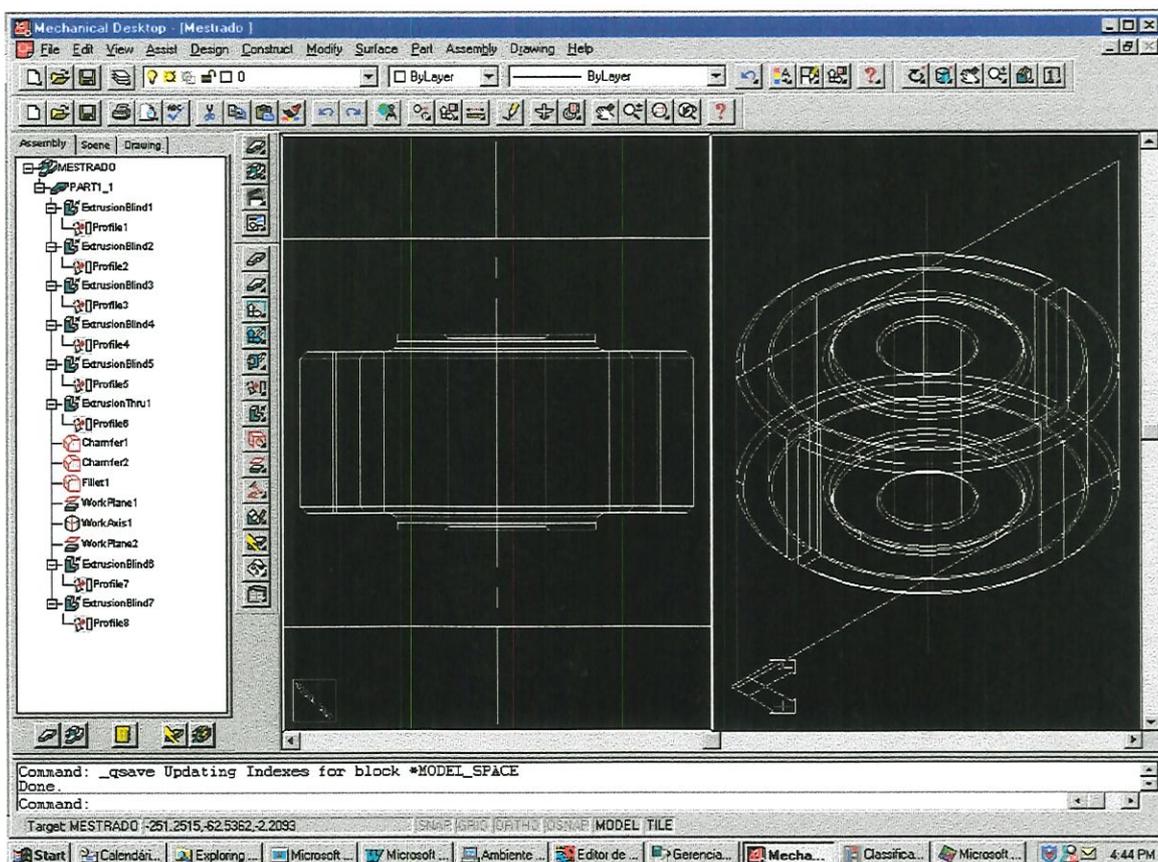
Também se pode realizar um trabalho de integração da solução com os sistemas relacionados a atividades anteriores que fornecem as informações de utilidade ao planejamento de processo, e esta solução forneceria os seus resultados como feedback para o reprojetado realizado nas atividades anteriores.

Com relação ao planejamento de processo de peças não paramétricas, pode-se desenvolver um trabalho de integração do CAPP com outros sistemas a fim de disponibilizar no CAPP as informações necessárias como entrada para o planejamento de processo. Informações como desenhos das peças, requisitos de produção, projeto do blank, tolerâncias do blank, material do blank, massa do blank, dados do blank pré-usinado, são informações que podem ser disponibilizadas no CAPP facilitando o planejamento de processo interativo das peças não paramétricas.

Também considerando as peças não paramétricas, pode-se realizar a integração da solução desenvolvida com modeladores baseados em feature, no sentido CAD-CAPP, fornecendo os features do CAD ao CAPP para ao menos um melhor entendimento das características das novas peças pelo usuário. Com os features, o CAPP pode oferecer ao usuário opções limitadas das operações macro disponíveis para manufaturá-los.

ANEXOS

Anexo A - Desenho de uma nova engrenagem regenerado automaticamente no Mechanical Desktop a partir dos valores de seus parâmetros cadastrados no Classificador de Componentes do CAPPE



Anexo B – Plano de processo macro da nova engrenagem gerado automaticamente no Editor de Planos Macro (CAPPE) a partir dos valores dos parâmetros da engrenagem cadastrados no Classificador de Componentes (CAPPE)

Editor de Planos Macro

Arquivos Editor Extras Janelas ?

Cabeçalho

Peça: 0002 Engrenagem teste
 Plano: 595 Revisão: 01 Status: EP

Operações

	Seq.	Máq.	Texto Operação	TPrep		peça/hora
✓	10.000	6080-8	Serrar	0.	>	
	20.000	9018-2	Tornear	0.357911	>	
	30.000	1454-8	Semi acabar Z dentes	0.	>	
	50.000	9349-2	Quebrar dentes	0.	>	
	60.000	1647-3	Acabar Z dentes	0.	>	
	70.000	7080-4	Gravar número	0.	>	
	80.000	2	Cementar, temperar, revenir	0.	>	
	90.000	1400-6	Retificar	0.	>	
	100.000	9385-6	Tornear face	0.	>	
	110.000	9524-9	Retificar	0.	>	
	120.000	HURT	Testar contato e ruído e eliminar batidas	0.	>	
	130.000	MAQ. NOVA	Tornear Face e Furo	0.399568	>	

Anexo C - Lista dos dispositivos de fixação para a operação macro de torneiar selecionados dentre os disponíveis para tal operação

Editor de Planos Macro

Arquivos Editar Extras Janelas ?

Cabeçalho

Peça: 0002 Engrenagem teste
 Plano: 595 Revisão: 01 Status: EP

Operações

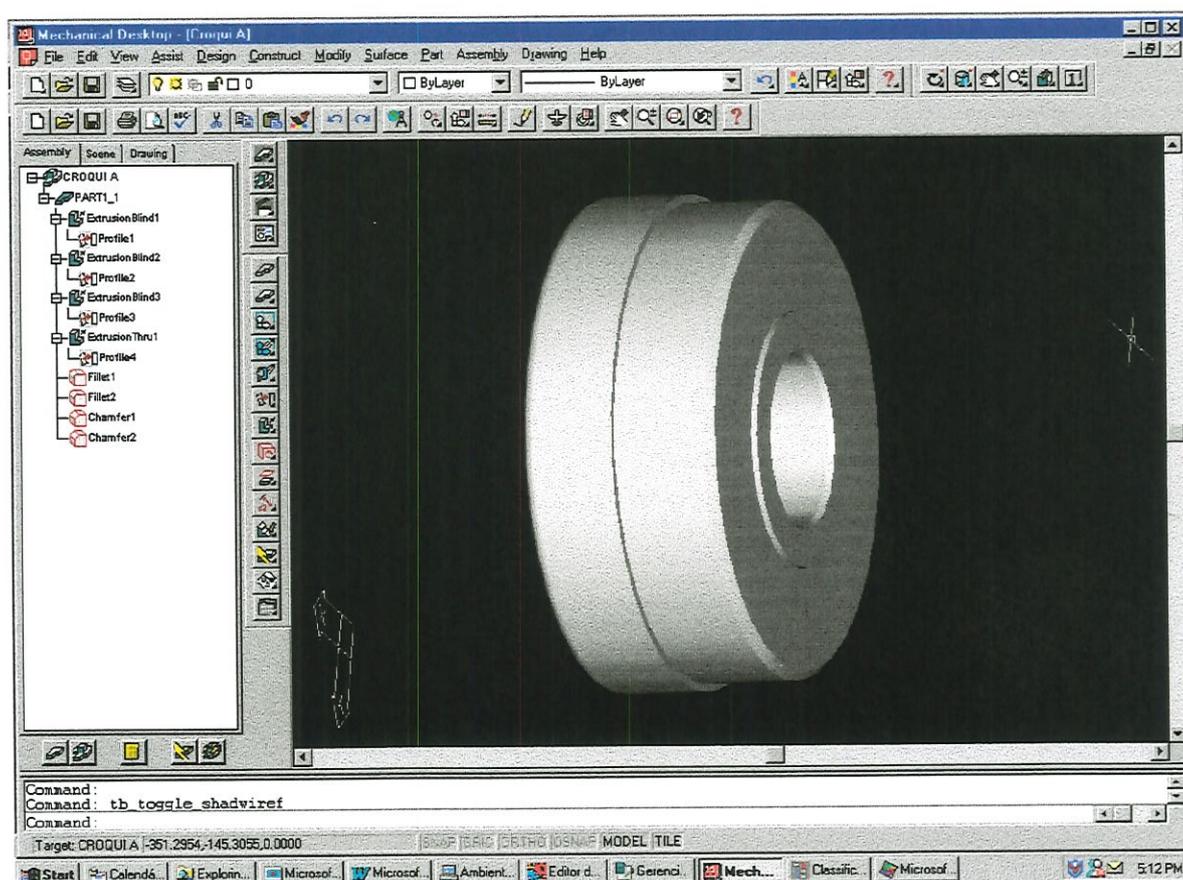
Seq.	Máq.	Texto Operação	TPrep	peça/hora
10.000	6080-8	Serrar	0.	
20.000	9018-2	Tornear	0.357911	
30.000	1454-8	Semi acabar Z dentes	0.	
50.000	9349-2	Quebrar dentes	0.	
60.000	1647-3	Acabar Z c		
70.000	7080-4	Gravar nún		
80.000	2	Cementar,		
90.000	1400-6	Retificar		
100.000	9385-6	Tornear fa		
110.000	9524-9	Retificar		
120.000	HURT	Testar con		
130.000	MAQ. NOVA	Tornear Fa		

Lista de Ferramentas

Pos.	Código	Nome	Qtde	F
	0002100588	Placa Especial Clark 3KFD-HF 315	1.	Dis
	0005307053	Castanhas Duras 241012 TORNO PE	1.	Dis
	0102113678	Mordente E Apoio DiA. 080,050	1.	Dis

Inserir...
 Apagar
 Consultar...
 Renumerar...
 Ordenar
 Ajuda

Anexo D - Croqui da operação macro de torneiar regenerado automaticamente no Mechanical Desktop a partir dos valores dos parâmetros de tal operação calculados automaticamente no Editor de Planos Macro (CAPPE) em função dos parâmetros da nova engrenagem cadastrados no Classificador de Componentes (CAPPE)



REFERÊNCIAS

- (1998). *Computer aided design*. www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/2549/cadcam.htm
(23 Mar.)
- (1999). *Benefícios do CAPP*. www.ksr.com.br (5 jun.)
- AMARAL, D.C. (1997). *Colaboração cliente-fornecedor no desenvolvimento de produto: integração, escopo e qualidade no projeto do produto*. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos.
- CAY, F.; CHASSAPIS, C. (1997). An IT view on perspectives of computer aided process planning research. *Computers in Industry*, v.34, p.307-337.
- CHANG, T.-C.; WYSK, R.A. (1985). *An introduction to automated process planning systems*. New Jersey, Prentice Hall.
- CHIZZOTTI, A. (1998). *Pesquisa em ciências humanas e sociais*. 2.ed. Sao Paulo, Cortez.
- CLARK, K.B.; FUJIMOTO, T. (1991). *Product development performance: strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, Massachusetts, Harvard Business School Press.
- DANE, F.C. (1990). *Research methods*. Belmont, California, Brooks/Cole Publishing Company.
- DAVIES, B.J. (1997). CIM software and interfaces. *Computers in Industry*. v.33, n.1, p.91-99.
- DHAMIJA, D.; KOONCE, D.A.; JUDD, R.P. (1997). Development of a unified data meta-model for CAD-CAPP-MRP-NC verification integration. *Computers and Industrial Engineering*, v.33, n.1-2, p.19-22.
- DIXON, J.R. (1966). *Design engineering: inventiveness, analysis, and decision making*. McGraw-Hill, Inc.
- HALEVI, G.; WEILL, R. (1995). *Principles of process planning*. London, Chapman & Hall.
- HAM, I.; LU, S.C.-Y. (1989). New developments of CAPP in U.S.A. and Japan. In: CIRP INTERNATIONAL WORKSHOP ON COMPUTER AIDED PROCESS PLANNING (CAPP), Hanover University, Fed. Rep. of Germany, September 21-22, 1989, p.1-23.
- HÄMMERLE, E. et al. (1991). Knowledge based process planning for one-of-a-kind production. In: JFIP WORKING CONFERENCE. *Process Planning for Complex Machining with AI-Methods*, Dresden, November 27-29.

- HAN, J.H.; ROSEN, D. (1998). Special panel session for feature recognition at the 1997 ASME Computers in Engineering Conference. *Computer-Aided Design*, v.30, n.13, p.979-982.
- HOUTEN, F.J.A.M. van. (1991). *PART: A computer aided process planning system*. 225p. Ph.D. Thesis, University of Twente.
- HOUTZEEL, A. (1998) *A CAPP Perspective*.
<http://www.mmsonline.com/articles/119504.htm> (25 May).
- JI, Q.; MAREFAT, M.M. (1997). Machine interpretation of CAD data for manufacturing applications. *ACM Computing Surveys*, v.24, n. 3, p.264-311, Sept.
- KANAI, S. et al. (1989). The flexible process-planning by combining the advanced CAPP, CAM and measuring system. Department of Precision Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- KIRITSIS, D. (1995). A review of knowledge-based expert systems for process planning. Methods and Problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.4, n.10, p.240-262.
- KRUTH, J.P. et al. (1994). Opportunistic process planning: a knowledge based technique for APP applications. *Computers in Engineering*, v.1, p.227-233.
- KRUTH, J.-P.; ZEIR, G.Van; DETAND, J. (1996). Extracting process planning information from various wire frame and feature based CAD systems. *Computers in Industry*, v.30, p.145-162, June.
- LAU, H.; JIANG, B. (1998). A generic integrated system from CAD to CAPP: a neutral file-cum-GT approach. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v.11, n.1-2, p.67-75.
- LAUDON, K.; LAUDON, J. (1998). *Management information systems. New approaches to organization and technology*. New Jersey, Prentice Hall.
- LEE, J.Y.; KIM, K. (1999). Generating alternative interpretations of machining features. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.15, p.38-48.
- LUO, J.L.H. et al. (1997). Object-oriented modelling for CAPP open architecture. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.v.10, n.1-4, p.74-82.
- MING, X.G.; MAK, K.L.; YAN, J.Q. (1998). A PDES/STEP-based information model for computer-aided process planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 14, p.347-361.
- NOLEN, J. (1989). *Computer-Automated Process Planning for World-Class Manufacturing*. New York, Marcel Dekker, Inc.
- OLIVEIRA, C.B.M.; ROZENFELD, H. (1997). Desenvolvimento de um módulo de FMEA num sistema comercial de CAPP. In: - XVII ENCONTRO NACIONAL DE

ENGENHARIA DE PRODUÇÃO / 3RD INTERNATIONAL CONGRESS OF INDUSTRIAL ENGINEERING. *Anais em CD* – Gramado.

- OMOKAWA, R. (1999). *Utilização de sistemas PDM em ambientes de engenharia simultânea: o caso de uma montadora de classe mundial de veículos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ÖZTÜRK, F. (1997). The use of machining features in set-up planning and fixture design to interface CAD to CAPP. *International Journal of Vehicle Design*, v.18, n.5, p.558-573.
- PITTS, G. (1973). *Techniques in engineering design*. Butterworth.
- PLONSKY, A. (1991). CAD: algumas receitas para evitar problemas (I). *Automação e Indústria*, v.4, n.29, p.16-17.
- PRABHU, B.S.; PANDE, S.S. (1999). Intelligent Interpretation of CADD drawings. *Computers & Graphics*, v.23, p.25-44.
- PUGH, S. (1991). *Total design. Integrated methods for successful integrated product engineering*. England, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- ROZENFELD, H. (1992). *Implantação distribuída de planejamento de processo assistido por computador na manufatura integrada*. Tese (Livre-docência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ROZENFELD, H. (1994). Sistema CAPP: seus conceitos, casos práticos e desenvolvimentos. *Máquinas e Metais*, p.124-142, mar.
- ROZENFELD, H. (1997). *Desenvolvimento de produtos na manufatura integrada*. www.numa.org.br/ (6 Jun.).
- ROZENFELD, H.; Ribeiro, C.E.S.; Kerry, H.T.; Pieber, E. (1996). Aplicação de uma solução CAPP para peças parametrizadas: um caso prático. *Máquinas e Metais*, p.186-199, abr.
- SALOMONS, O.W.; HOUTEN, F.J.A.M. van; KALS, H.J.J. (1993). Review of research in feature-based design. *Journal of Manufacturing Systems*, v.12, n.2, p.113-132.
- SCHULZ, H.; SCHÜTZER, K. (1993). Integração de projeto e planejamento baseada em feature. *Máquinas e Metais*, p. 28-37, set.
- SMITH, R.M. (1981). Computer-aided, fully generative process planning. *Manufacturing Engineering*, v.16, p.98-99, May.
- SORMAZ, D.N.; KHOSHNEVIS, B. (1997). Process planning knowledge representation using an object-oriented data model. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v.10, n.1-4, p.92-104.

- TIBERTI, A.J. (1996). *Desenvolvimento de um sistema gerenciador de fluxo de trabalho para um ambiente de suporte a atividades de engenharia*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ULLMAN, D.G. (1992). *The mechanical design process*. New York, McGraw-Hill, Inc.
- VERNADAT, F.B. (1996). *Enterprise modeling and integration: principles and applications*. London, Chapman & Hall.
- WANDECK, M. (1994). Integração de CAD e processo: um meio para simular variações. *Máquinas e Metais*, p.100-106, maio.
- WANG, H.-P.; LI, J.-K. (1991). *Computer-aided process planning*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V.
- WARNECKE, G.; MERTENS, P.; SCHULZ, Ch. (1989). Artificial intelligence in computer integrated manufacturing. In: CIRP INTERNATIONAL WORKSHOP ON COMPUTER AIDED PROCESS PLANNING (CAPP), Hanover University, Fed. Rep. of Germany, September 21-22, 1989, p.185-196.
- WOODSON, T.T. (1966). *Engineering Design*. McGraw-Hill, Inc.

GLOSSÁRIO

Blank	– Peça em bruto a ser processada em máquina-ferramenta
CLASSCOM	– Módulo do CAPPE (sistema comercial de CAPP) relativo à classificação dos componentes cadastrados no sistema
Configurador do Ambiente	– Módulo do CAPPE relativo à configuração de todo o sistema.
Dicionário de Variáveis	– Módulo do CAPPE relativo ao gerenciamento das variáveis cadastradas no sistema
Editor de Planos Macro	– Módulo do CAPPE relativo à edição dos planos de processo macro
EXPRESS	– Linguagem declarativa projetada especificamente para a especificação de esquemas de dados para o propósito do STEP
Gerenciador de Fórmulas	– Módulo do CAPPE relativo ao gerenciamento das fórmulas cadastradas no sistema
Gerenciador de Recursos de Planejamento	– Módulo do CAPPE relativo ao gerenciamento dos recursos de planejamento cadastrados no sistema
LISP	– Linguagem de programação computacional de alto nível, bastante utilizada em sistemas de inteligência artificial
Rendering Systems	– Sistemas gráficos de interpretação em CAD
Script	– Roteiro, narrativa. No contexto: linhas de programação computacional
String	– Variável do tipo seqüência de caracteres
Tagushi	– Método para otimização de produtos baseado em resultados estatísticos de experimentos de qualidade
Wireframe	– Modelagem em arame- método de modelagem geométrica em CAD

Alexandre Balderi Xella
e-mail: agreat@bigfoot.com
homepage: <http://www.bigfoot.com/~agreat>