

Capítulo 3

O CAD e o Seu Papel na Manufatura

INTRODUÇÃO

O propósito deste capítulo é mostrar como dados do CAD são usados para o planejamento e controle do processo de manufatura. O principal objetivo deste capítulo é descrever os métodos usados para produzir documentos, desenhos, listas de materiais, planos de processos, etc. Serão também ilustrados os procedimentos necessários para automatizar estas atividades e como elas relacionam-se entre si para que se tenham sistemas de manufatura coordenados, flexíveis e automatizados.

PERSPECTIVA HISTÓRICA

O CAD é uma tecnologia relativamente nova e somente tornou-se uma ferramenta fundamental na engenharia nos anos 80. O uso dessa tecnologia revolucionou as práticas normais dos projetistas na indústria.

A origem do CAD corresponde a uma série de projetos independentes (1956-1959) que começaram nos anos 50 com o projeto APT no M.I.T. APT significa “Ferramentas de Programação Automática”, e tinha o intuito de ser usado para representar as formas geométricas de peças em máquinas de comando numérico desempenhando operações de alta precisão. Um outro projeto foi o desenvolvimento da “light-pen” que originou-se no projeto de radar chamado SAGE (“Semi-Automated Ground Environment system”). O objetivo deste projeto era desenvolver um sistema que pudesse ser usado para analisar dados de radar e apresentar possíveis posições de aeronaves na tela CRT (“Tubo de Raios Catódicos”)

Tais sistemas culminaram no desenvolvimento do primeiro sistema denominado de “sketchpad” (folha de rascunho)¹ no M.I.T. em 1962, que foi o primeiro sistema interativo de computação gráfica. Antes deste desenvolvimento, computadores eram usados para efetuar cálculos de engenharia, mas com o advento deste sistema o projetista pôde interagir graficamente com o computador usando o CRT e a “light-pen”.

Apesar deste primeiro “sketchpad” limitar-se à representação de objetos em 2-D, agora desenhos podiam ser analisados usando-se programas para assegurar a validade estrutural. Em 1963, a capacidade do “sketchpad” foi estendida para 3-D. Com este sistema, tornou-se possível efetuar desenhos em perspectiva de objetos na tela CRT.

Um aspecto especial do computador é que ele pode tornar informações básicas de produtos prontamente disponíveis para o projeto do produto, além de várias atividades operacionais,

planejamento dos processos, e a geração de programas para acionar os equipamentos de manufatura. Portanto, os dados somente têm que ser introduzidos uma vez no sistema, e então serem acessados por várias atividades, como ilustrado na figura 3.1. Informações tecnológicas tais como materiais, desenhos associados a dados organizacionais incluindo o número e o formato do desenho, e todos os dados organizacionais relacionados à peça estão contidos no arquivo do produto.

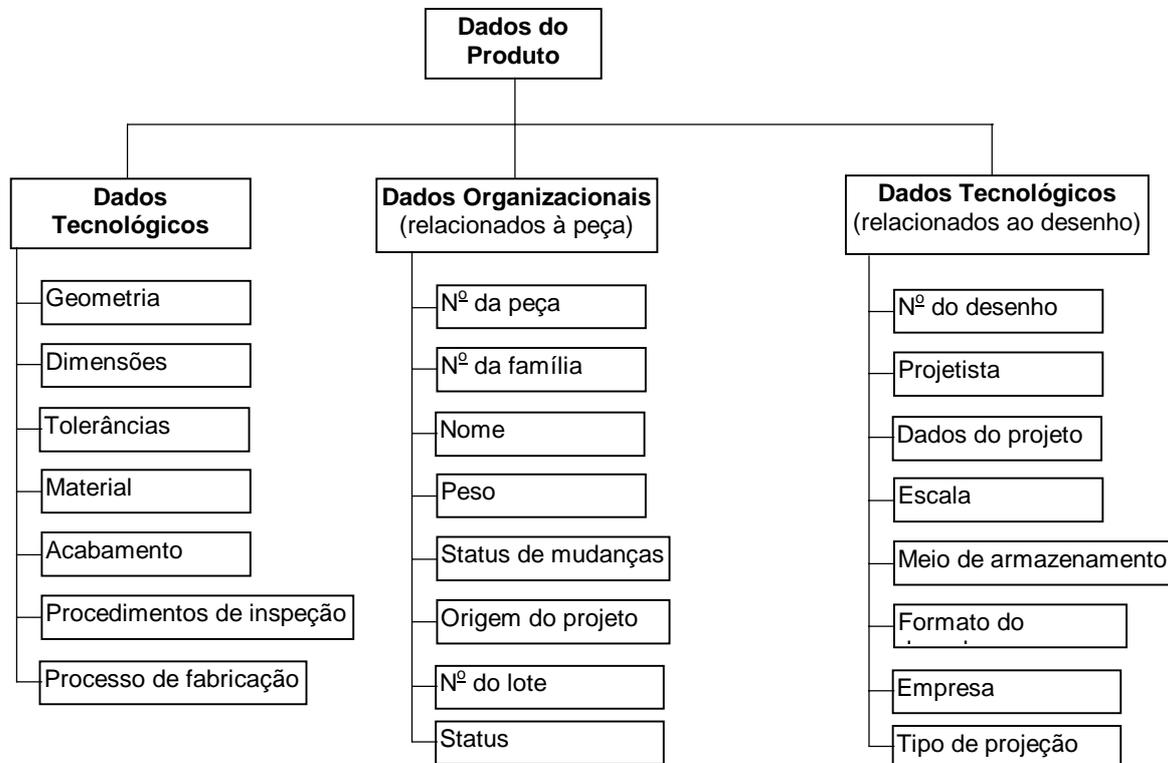


Figura 3.1. Base de dados do CAD contendo informações sobre o planejamento do produto e da manufatura

Um sistema interativo de computação gráfica deve ser orientado para o usuário, através do qual o computador pode ser usado para criar, transformar e mostrar dados sob a forma de figuras e símbolos. O computador comunica ao usuário através da tela, onde imagens são criadas introduzindo-se comandos para chamar as subrotinas desejadas. Elementos geométricos tais como pontos, linhas podem ser aumentados ou reduzidos, e movidos de um lugar para outro na tela através dos processos de rotação e translação.

O sistema interativo de computação gráfica normalmente inclui hardware e software. O hardware pode ser composto da CPU, uma ou mais telas gráficas, e periféricos tais como impressoras, plotadoras e mouses (ou mesas digitalizadoras). O software inclui aqueles programas necessários para uma variedade de processamentos gráficos do sistema (p.ex. AutoCAD).

¹ Ivan Sutherland, "Sketchpad: A Man-Machine Graphical Communication System", Tese de Doutorado, M.I.T., 1962

A vantagem de um sistema interativo de computação gráfica é o efeito sinérgico sobre o processo de projeto. O projetista é capaz de desempenhar o aspecto do projeto mais adequado para as habilidades do homem incluindo a concepção e o raciocínio. O computador efetua atividades mais difíceis para o homem, como cálculos rápidos, exposição de desenhos na tela, e armazenamento de grandes quantidades de dados.

A evolução do CAD/CAM foi fortemente influenciada pelos projetos do APT e do “sketchpad”. A união destes sistemas possibilitou a geração de programas de comando numérico a partir do modelo geométrico do projeto no computador, pelo qual as atividades de projeto e manufatura podem usar a mesma base de dados do CAD, como ilustrado na figura 3.1.

Os sistemas CAD iniciais eram muito caros e portanto o uso de tais sistemas era limitado a grandes indústrias. No início dos anos 60 principalmente as empresas automotivas e aeronáuticas experimentaram vários sistemas de computação gráfica. No fim dos anos 60 emergiram inúmeros desenvolvedores de sistemas CAD. Nos anos 80 houve um enorme crescimento desta indústria. Hoje, a maioria dos produtos são projetados em sistemas CAD, e espera-se que em breve as informações sobre a especificação do produto façam parte dos dados do CAD.

O PROCESSO DE PROJETO

O processo convencional de projeto é ilustrado na figura 3.2. A primeira fase começa com o reconhecimento de que um consumidor tem uma necessidade de um produto. Este reconhecimento pode corresponder à descoberta de um sistema não otimizado que deve ser reprojetoado, ou à conclusão de que o mercado precisa de um certo produto novo.

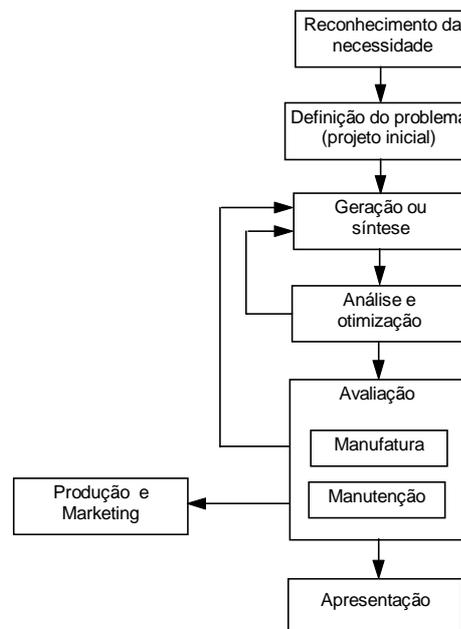


Figura 3.2. Processo tradicional de projeto

A segunda fase é a definição do problema. Esta é a especificação do produto que será projetado. Ela inclui a determinação das características físicas e funcionais do produto, seu princípio de operação e vida em serviço. Ela também pode envolver o levantamento de dados sobre custos, exigências e normas legais, fabricação, ou exigências de qualidade e manutenção.

A terceira fase é a concepção de uma nova geração de produtos ou a síntese de projetos alternativos. Essa é uma fase muito criativa. Frequentemente acredita-se que essa fase é a mais importante, e é onde a criatividade do projetista é efetivamente empregada. A síntese do projeto é normalmente atrelada à quarta fase, a análise, pois a representação de um conceito normalmente se sujeitaria à análise, que pode resultar num projeto melhorado baseado nas restrições da análise. Este processo pode ser repetido várias vezes até que o projeto seja otimizado.

A quinta fase é a avaliação. Nela, pode-se tentar usar especificações definidas que podem corresponder a práticas padrão de engenharia e manufatura pelas quais o projeto é avaliado de forma a assegurar que as restrições estabelecidas no estágio de definição do problema não sejam violadas. Os sistemas de avaliação devem incluir a manufaturabilidade e a manutenibilidade. Tradicionalmente, a avaliação pode requerer a fabricação de um protótipo e a execução de testes para determinar seu desempenho, qualidade, vida, etc. Mas com os avanços na tecnologia dos computadores, agora é frequentemente possível modelar e testar protótipos no computador. Isto economiza tempo e dinheiro.

Finalmente, o projeto é apresentado através de documentos de engenharia, e num ambiente moderno de manufatura os dados de projeto podem também ser transferidos diretamente para um sistema de planejamento de processos para a manufatura do produto.

HIERARQUIA DE PROJETO

Projetos complexos, tais como o de um avião, são executados por muitas equipes. Cada equipe pode ainda ter muitas outras equipes menores. Por exemplo, um avião é composto por milhares de componentes, um dos quais é o motor a jato. O motor é normalmente projetado por uma equipe de engenheiros, que são responsáveis por partes individuais do motor. Os projetos produzidos por várias equipes têm que ser montados para testar o produto final. Entretanto, este teste não impede os testes que equipes individuais efetuam em seus componentes específicos de forma a certificá-los como completos.

Devido à execução das atividades inerentes do projeto, isto é, gerar-testar peças e sistemas, pode-se concluir que existem duas abordagens de projeto: a “bottom-up” e a “top-down”. Na “bottom-up”, o projetista efetua o projeto detalhado das peças para a montagem do produto. Na abordagem “top-down”, o projetista toma a decisão global sobre o produto antes de considerar as peças detalhadas.

O processo de projeto necessita de ambas as abordagens para ser efetivo. Decisões de alto nível tomadas sobre o projeto de um produto dependem de várias características das peças, tais como o uso

Sistemas Integrados de Manufatura

e o custo das peças ou a violação de uma lei da física. De maneira similar, decisões de nível mais baixo referem-se à confiabilidade e a função do produto. Por exemplo, cada peça isoladamente pode não indicar seu comportamento interativo com outras peças até que seja considerado como parte de todo o sistema.

Se, entretanto, a fase de especificação do problema fornece restrições adequadas e regras precisas de fabricação (e/ou montagem), então a abordagem “bottom-up” seria a alternativa preferida. Isto porque esta abordagem geraria produtos mais confiáveis se as restrições fossem obedecidas rigorosamente.

O PAPEL DO COMPUTADOR NO PROCESSO DE PROJETO

Quando o computador é usado no projeto, muitas atividades de engenharia podem ser automatizadas; entretanto, as fases de projeto são as mesmas como o método convencional (ver figura 3.2). A aplicação do computador ao projeto pode ser dividido em 5 áreas:

- definição do problema
- modelagem geométrica
- análise de engenharia
- avaliação do projeto
- desenho automático

Definição do problema

Nessa atividade, o projetista deve ser muito criativo para determinar as funções, desempenho e aparência do produto. Aqui o computador pode não ser de grande auxílio, pois ele não possui a experiência humana. Se, entretanto, o produto tiver sido projetado antes, o computador pode ser uma ferramenta importante para sugerir um projeto existente e para procurar peças padronizadas e processos de manufatura.

Modelagem geométrica

A modelagem geométrica envolve o uso do computador para empregar uma descrição matemática da geometria de um objeto na representação de um objeto. Normalmente, o objeto é simplificado e somente suas características essenciais são representadas. Estas descrições matemáticas possibilitam a imagem do objeto ser mostrada na tela gráfica e o objeto pode ser animado para mostrar suas características operacionais. Com o auxílio da animação é possível detectar problemas e sugerir ações corretivas.

Análise de engenharia

Os projetos requerem normalmente alguma forma de análise. Isto pode envolver a modelagem por elementos finitos e cálculos para determinar o desempenho dinâmico do projeto. Alguns programas podem ser empregados para simular o desempenho do projeto e para obter informações em tais questões como consumo de potência, transferência de calor, desgaste, interferência, etc. Otimização é também possível se alguma medida pode ser representada sujeita a algumas restrições de desempenho. No processo tradicional de projeto, estes programas de desempenho são empregados num estágio mais tarde do projeto em vez de no estágio conceitual porque eles normalmente requerem dados precisos sobre as dimensões, forma, materiais, etc.

Avaliação do projeto

A avaliação de projetos consiste em assegurar que regras específicas estabelecidas para o projeto de um certo tipo de produto não são violadas. Algumas dessas regras são procedimentos operacionais padronizados; outros são custos, regras de manutenção, etc. Essa fase é onde a precisão de um projeto é verificada, a manufaturabilidade e montabilidade são avaliadas, e a cinemática é investigada.

Desenho automático

O desenho automático consiste na obtenção de desenhos detalhados usados para comunicar as informações do projeto para o planejamento de processos, programação dos equipamentos de manufatura, etc. No início, a aplicação da computação gráfica interativa tinha como objetivo facilitar somente o desenho, pois a produtividade do desenho pode aumentar muitas vezes com o uso do CAD. Com o CAD, as funções de desenho de dimensionamento automático é possível, junto com a geração de áreas hachuradas, escalas e vistas. Vistas podem ser aumentadas e objetos podem ser girados ou transladados para obter vistas oblíquas, isométricas ou perspectivas da peça.

MÉTODOS DE CONSTRUÇÃO DE ELEMENTOS GEOMÉTRICOS NO CAD

Na maioria dos desenhos de engenharia, os elementos geométricos são construídos a partir de elementos geométricos básicos. Estas entidades podem ser criadas como mostrado nas figuras 3.3, 3.4 e 3.5. Elas são introduzidas no computador interativamente através de símbolos gráficos ou linguagens textuais de programação. Os mesmos tipos de elementos são também utilizados para gerar o programa NC para descrever o contorno de uma peça para uma máquina-ferramenta. Em muitas aplicações mais simples, a ligação entre CAD e CAM é feita pelo uso direto da descrição gráfica da peça para gerar o programa NC.

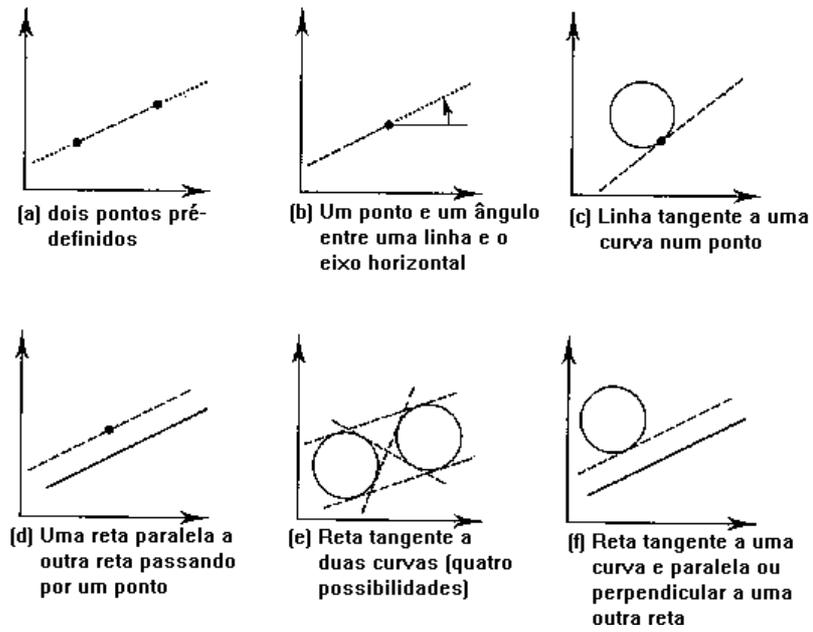


Figura 3.3. Construção de uma linha reta

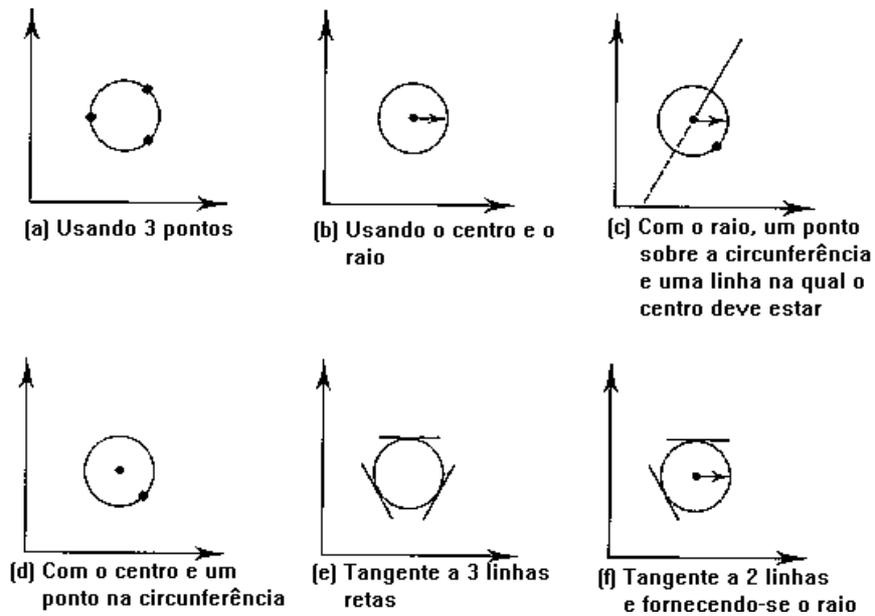


Figura 3.4. Construção de círculos

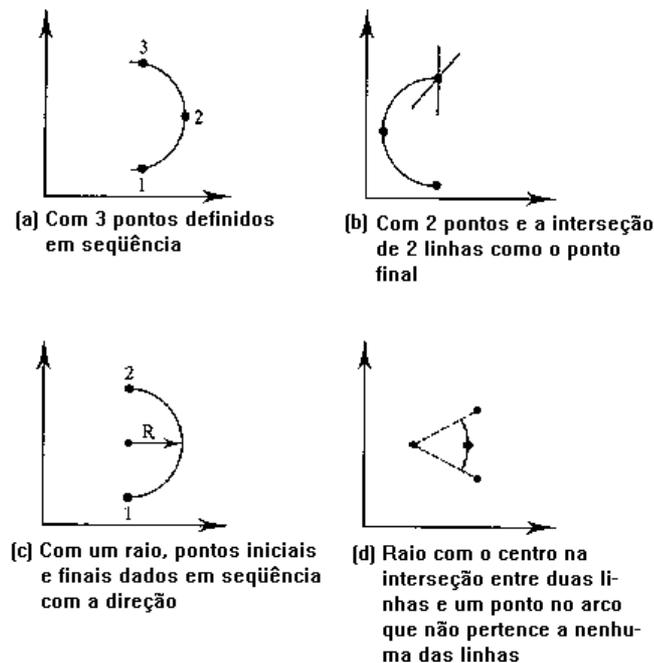


Figura 3.5. Construção de arcos de círculo

Outras entidades mais complexas correspondem a cônicas, curvas e superfícies, que são descritas rapidamente a seguir.

Cônicas

Cônicas tais como parábolas, hipérbolas e elipses podem ser construídas especificando-se 5 pontos, ou por duas linhas ortogonais e o ponto de interseção das linhas.

Curvas e superfícies

Curvas e superfícies podem ser descritas pelas expressões matemáticas que interpolam pontos dados. Existem muitas funções para a geração de curvas, incluindo curvas de Bézier e B-splines, que empregam um processo de “*blending*” (combinação) para suavizar os pontos dados.

As superfícies geradas através de expressões matemáticas podem ser compostas por várias curvas e superfícies (p.ex. casco de navio, carroceria de carro). As superfícies podem ser geradas girando-se uma linha ou curva em torno de um eixo para produzir uma superfície de revolução. Uma outra abordagem consiste no uso da linha de interseção entre duas superfícies. Tipicamente, superfícies geradas usando-se funções “*blending*” são definidas em certas porções do espaço. Cada região da definição é um “*patch*” (remendo). Um objeto muitas vezes requer vários desses “*patches*” para ser modelado. Portanto, o que é obtido é normalmente uma montagem de “*patches*”. Em geral, quanto menor o grau do polinômio dos “*patches*” usados, mais “*patches*” serão necessários.

MODELAGEM E BASE DE DADOS NO CAD

A base de dados do sistema CAD contém elementos gráficos básicos tais como pontos, linhas e curvas, e elementos que definem a geometria e topologia do objeto, resultando na sua forma. A topologia corresponde à rede na qual os elementos geométricos são interconectados. A geometria mostra os itens que auxiliam a completar a descrição da forma, como as dimensões. É importante que sistemas CAD contenham informações referentes à aplicação e organização, tais como propriedades de materiais e programas específicos de análise (p.ex. elementos finitos).

ESQUEMAS DE REPRESENTAÇÃO POR SÓLIDOS

Um objeto sólido é um objeto que possui um volume finito no espaço, e que possui tanto propriedades geométricas como superfície, volume e centro, como também propriedades físicas como massa, centro de gravidade e inércia. Um sistema de modelagem de sólidos pode normalmente representar tanto propriedades geométricas como físicas de um objeto sólido. Além disso, com um modelador de sólidos, várias informações para aplicações de engenharia podem ser obtidas de um sistema CAD, tais como o programa NC e elementos finitos, agregando-se subprogramas adequados ao modelador.

Representação CSG (“Constructive Solid Geometry”)

A representação CSG é uma árvore binária ilustrada na figura 3.6. Os nós não-terminais representam operadores, que podem ser movimentos rígidos ou operações booleanas (união, interseção e diferença). Os nós terminais podem ser primitivas (sólidos) ou movimentos rígidos.

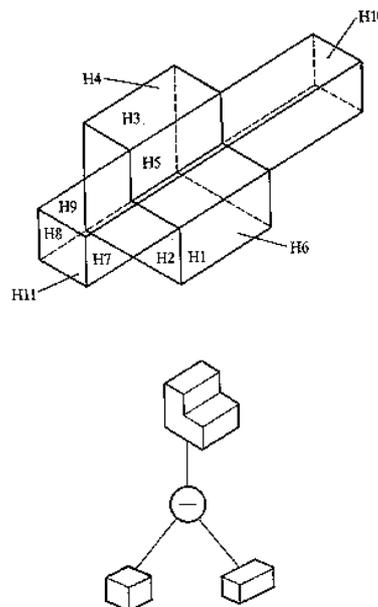


Figura 3.6. Representação CSG

Basicamente, CSG é uma representação explícita parcialmente geométrica com informações topológicas implícitas. Por exemplo, na figura 3.6, o objeto sólido pode ser representado em CSG como:

$$\text{bloco}(10,10,10) - \text{bloco}(5,20,5).$$

Esta representação CSG pode ser modificada de forma que o objeto sólido pode ser representado como uma expressão booleana como descrito abaixo:

$$(H_1 \cap H_2 \cap H_3 \cap H_4 \cap H_5 \cap H_6) \cap (H_7 \cup H_8 \cup H_9 \cup H_{10} \cup H_{11} \cup H_{12})$$

Qualquer ponto no espaço do modelo para o qual esta expressão booleana é verdadeira pertence ao interior do objeto sólido. Na equação, todos os meio-espacos que indicam a localização de um plano no sistema coordenado especificado são dados geométricos, e todas as relações topológicas são inferidas a partir do operador booleano.

As vantagens da representação CSG são as seguintes:

- é concisa;
- ela garante, automaticamente, que os objetos são válidos;
- os algoritmos para converter CSG em B-rep são conhecidos e confiáveis.

Representação B-rep (“Boundary Representation”)

Um esquema B-rep representa um sólido segmentando o seu contorno num número finito de subconjuntos interligados normalmente chamados faces (ou “*patches*”), e representando cada face por suas arestas (que compõem um contorno) e vértices. A figura 3.7 mostra um exemplo de B-rep.

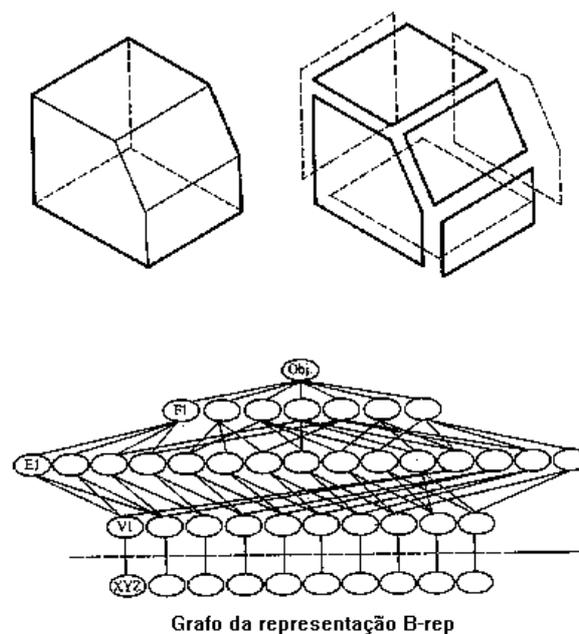


Figura 3.7. Representação B-rep

Basicamente, B-rep é uma representação explícita da topologia. A árvore B-rep é uma árvore de relação topológica. Para as peças A e B na figura 3.8, as relações topológicas entre vértices, arestas e faces são completamente idênticas. A diferença corresponde às coordenadas dos pontos na árvore B-rep (deve-se lembrar que há também modificações nas equações das curvas e superfícies).

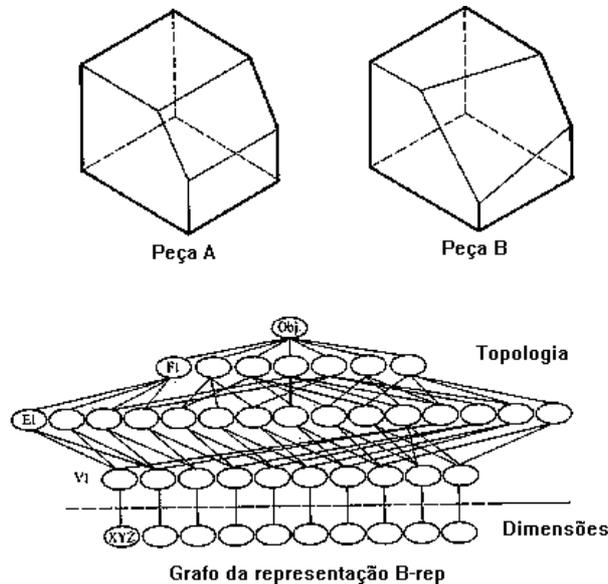


Figura 3.8. Representação B-rep mostrando dois objetos diferentes com a mesma topologia

As vantagens da representação B-rep são as seguintes:

- as informações são completas, e esta representação tem uma longa história na comunidade de CAD, e portanto existem muitos softwares disponíveis para a manipulação dos seus dados geométricos;
- as aplicações e algoritmos baseados em B-rep são competitivos com aqueles baseados em CSG;
- a tecnologia disponível para superfícies “sculptured” baseia-se em superfícies, e portanto é mais fácil incorporá-la em sistemas B-rep dos que em sistemas CSG.

LISTA DE MATERIAIS (“BOM”)

Uma lista de materiais é uma estrutura de dados do produto que inclui os produtos finais, seus subconjuntos, suas quantidades e relacionamentos. A estrutura de uma lista de peças determina a acessibilidade às informações da peça por vários departamentos numa empresa. Ela também auxilia na determinação do nível de dificuldade por parte do equipamento computacional na procura das informações de um produto. Em muitas empresas a lista de materiais é estruturada para a conveniência de departamentos individuais. Porém, isto resulta em problemas para outros departamentos.

Na figura 3.9, um produto chamado *produto 1* é mostrado graficamente com sua estrutura do produto, e a quantidade de todos os itens que são necessários para confeccionar o produto é indicada

em parênteses. A figura 3.10 contém uma lista de materiais para o produto 1 na qual a quantidade total da cada item é repassado para uma lista única. Esta espécie de lista é conveniente para o plano mestre de produção, porém resulta na duplicação de subconjuntos. Isto implica que cada lista de produto que contém subconjuntos a serem montados deve ser alterada sempre que houver uma mudança nos subconjuntos. Além disso, como os lead-times de montagens intermediárias não estão indicados nessa lista, as peças são encomendadas muito cedo na primeira vez que elas são encontradas na estrutura do produto.

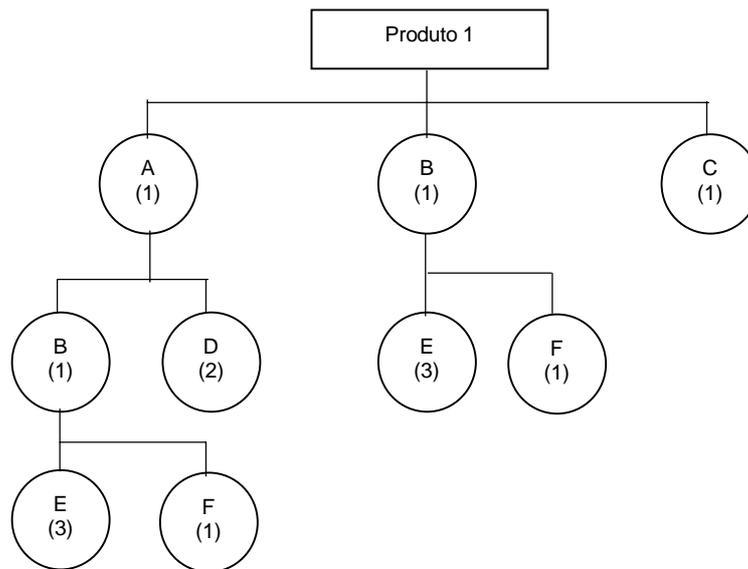


Figura 3.9. Estrutura do produto 1

<i>Peça</i>	<i>Quantidade</i>
A	1
B	2
C	1
D	2
E	6
F	2

Figura 3.10. Lista de materiais resumida

Um outro arranjo usado na lista de materiais consiste em tabular os dados do produto como ilustrado na figura 3.11. Uma desvantagem desse método é que todas as peças de uma montagem são repetidas cada vez que um subconjunto é utilizado, resultando numa enorme duplicação dos dados. Uma solução para o problema da duplicação é separar cada subconjunto numa lista de materiais de um único nível, como ilustrado na figura 3.12. Nesta abordagem, identifica-se somente as peças

usadas por um nível e um subconjunto requerido. Isto significa que mudanças na engenharia podem ser feitas num nível específico.

<i>Produto 1</i>			<i>Quantidade</i>
A			1
	B	E	1
		F	3
	D		1
			2
B			1
	E		3
	F		1
C			1

Figura 3.11. Lista de materiais tabulada

Nível 1	Peça/Produto 1	Quantidade	Ponteiro para nível
	A B C	1 1 1	A (nível 2) B (nível 3)
Nível 2	Peça/A	Quantidade	Ponteiro para nível
	B D	1 2	B (nível 3)
Nível 3	Peça/B	Quantidade	Ponteiro para
	E F	3 1	

Figura 3.12. Lista de materiais de nível-único

Nenhuma das estruturas de arquivo descritas acima realmente mostra quando um item é usado em todos os subconjuntos e produtos. Alguns sistemas mantêm um arquivo separado somente para isto, o que causa problemas de manutenção.

Existem normalmente dois tipos de listas de materiais necessárias para um produto: de engenharia e manufatura. A de engenharia normalmente lista itens de acordo com suas relações com os subconjuntos pai. Mas isto pode não ser suficiente para mostrar que as restrições ou tolerâncias de manufatura podem forçar um arranjo diferente da estrutura do produto de forma a assegurar a

manufaturabilidade. Portanto, a engenharia e a manufatura normalmente têm pontos de vista diferentes para o mesmo produto.

A tabela 3.1 mostra as informações típicas que podem ser encontradas numa lista de materiais.

Tabela 3.1. Informações típicas numa lista de materiais

<i>Tipo de material usado</i>	<i>Ferramentas e matrizes usadas</i>
Nome da peça	Nº de identificação da peça
Produto pai	Quantidade necessária
Nº de classificação	Tipo de peça padronizada
Unidades de medida	No do plano de processos
Origem da peça	Peso da peça
Nº da versão	Valor da peça
Status da produção	Formato do desenho
Nº do desenho	
Arquivo de descrição da peça	

INTERFACES PARA CAD/CAM

Desde a introdução do computador como uma ferramenta para a automatização do planejamento e controle de operações de manufatura, o problema de interligar os vários sistemas de software e hardware tornou-se uma grande questão. Os primeiros sistemas de planejamento e controle baseados no computador foram projetados e configurados para aplicações dedicadas. Era extremamente difícil e freqüentemente impossível usar módulos de software e hardware desenvolvidos para uma fábrica e usá-los para a configuração de um sistema de planejamento e controle numa outra fábrica. Isto resultou em atividades de padronização em quase todos os países industrializados. Também uma tentativa foi feita para produzir normas a nível internacional para conceber interfaces padrão para interligar sistemas CAD e CAM de forma a transferir dados de projeto para as atividades de planejamento da manufatura. As informações que são comunicadas através das interfaces contêm dados gráficos, de desenho, geométricos e do produto, como ilustrado na figura 3.13. Estes dados são usados para o planejamento de processos, agendamento (“scheduling”), manufatura e controle de qualidade.

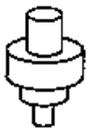
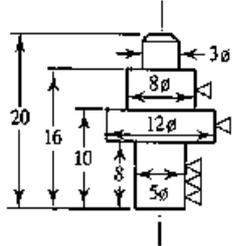
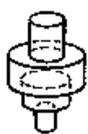
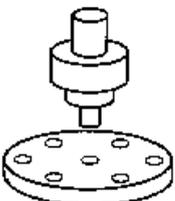
Dados Gráficos	Dados de Desenho	Dados Geométricos	Dados do Modelo do Prod.
		 p.ex. wireframe	
2-D/3-D vetorial 2-D/3-D raster	Geometria 2-D Dimensões Projeções	2-D/3-D wireframe Modelo de superfície 3-D Modelo volumétrico	Estrutura do produto Geometria "Features"

Figura 3.13. Informações do produto que são comunicadas entre atividades de CAD e CAM

O conceito de um sistema universal de troca de dados é ilustrado na figura 3.14. Nessa figura é ilustrado como vários sistemas CAD comunicam-se com o sistema de planejamento e controle da produção. A adaptação de protocolos, formatos de dados e taxas de transmissão de dados é feita pela interface. A interface deve fornecer compatibilidade elétrica e física, e ela deve assegurar que a semântica das informações trocadas seja mantida. A conversão de dados pode ser feita diretamente na interface com pré ou pós-processadores. Com o auxílio de tal interface torna-se possível o uso de módulos de software e hardware existentes para várias aplicações na fábrica. Além disso, os dados de manufatura de uma empresa podem ser facilmente combinados com aqueles de fornecedores. É também possível construir sistemas de planejamento e controle da manufatura a partir de módulos heterogêneos desenvolvidos por diferentes fornecedores.

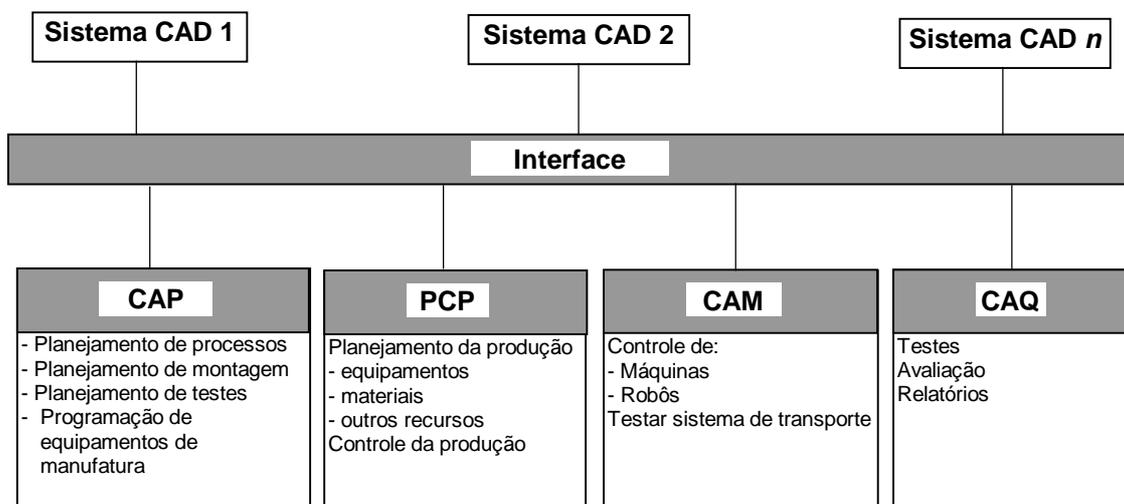


Figura 3.14. Interface universal para a interligação de atividades de planejamento e controle feitas pelo computador num sistema de manufatura

Existem certas exigências que uma interface padronizada deve ser capaz de fornecer. Elas são:

- A interface deve ser capaz de manusear todos os dados de manufatura;
- Não deve haver perda de informações quando os dados são transferidos entre sistemas heterogêneos. Em outras palavras, deve ser possível manter a semântica durante a conversão;
- O sistema deve ser eficiente e ser capaz de satisfazer as exigências de tempo real de um sistema de manufatura;
- O sistema deve ser aberto para permitir extensões ou contrações;
- O sistema deve ser adaptável a diferentes padrões;
- O sistema deve ser independente do computador e arquitetura de comunicação utilizados;

DESCRIÇÃO DE ALGUMAS INTERFACES

IGES (“Initial Graphics Exchange Specification”)

O conceito básico do IGES consiste na troca de dados contendo a descrição do produto de um sistema CAD para outro. Essa troca ocorre através de um formato neutro, como ilustrado na figura 3.15. As informações a serem transferidas são convertidas através de um pré-processador para o formato neutro especificado pelo IGES, e então convertidas através de um pós-processador para o formato próprio do outro sistema CAD. Com esse conceito, é possível transferir dados de CAD entre quaisquer sistemas CAD, desde que eles estejam equipados com os pré e pós-processadores correspondentes. O IGES tenta representar desenhos técnicos; modelos wireframe, de superfície e sólidos; modelos de elementos finitos; etc.

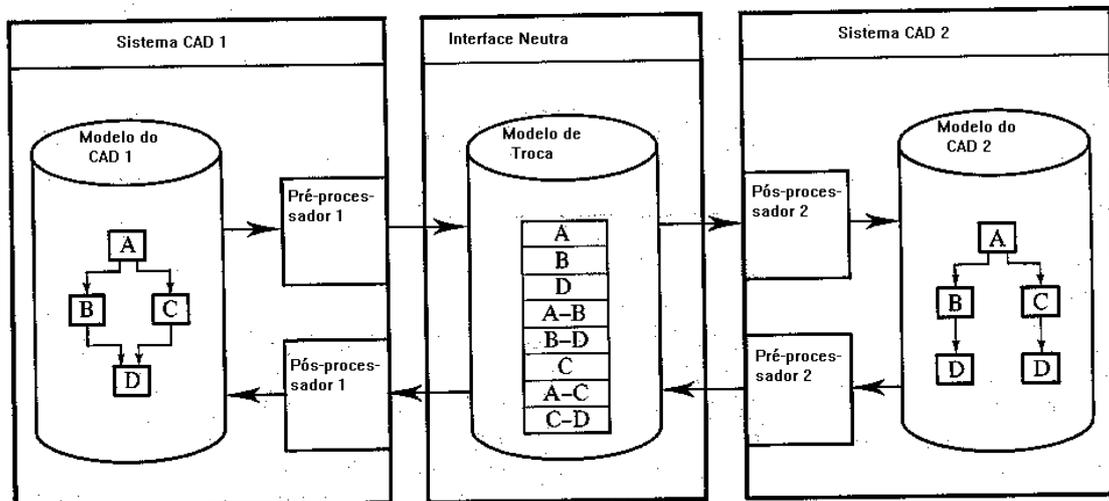


Figura 3.15. Troca de modelos da CAD entre diferentes sistemas CAD

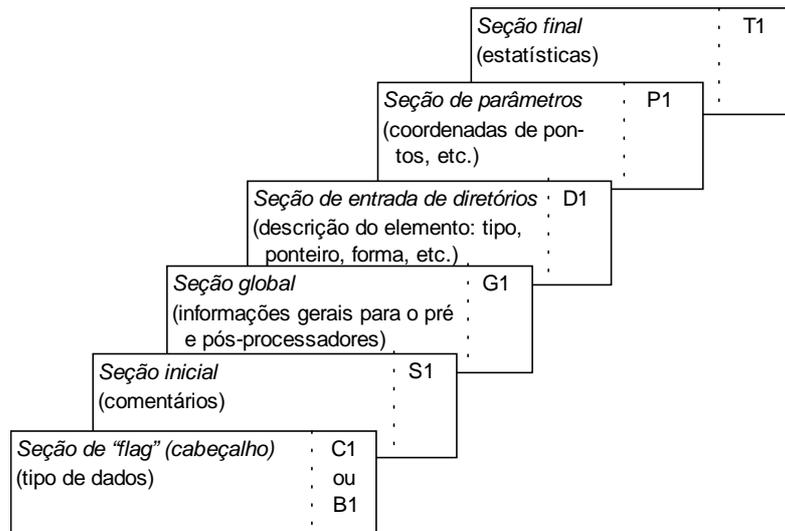
As versões do formato IGES desenvolvidas até hoje foram as seguintes:

<i>Versão</i>	<i>Ano</i>
IGES - Versão 1.0	1981
IGES - Versão 2.0	1983
IGES - Versão 3.0	1984
IGES - Versão 4.0	1986
IGES - Versão 5.0	1988

A versão 1.0 foi concebida para os sistemas CAD dos anos 70. Atualmente, a maioria dos softwares incluem as versões 2.0 e 3.0.

O IGES contém registros de 80 caracteres de comprimento que são apresentados através de 80 colunas num formato de cartão. As colunas 1-72 contêm informações em código ASCII, e as colunas 73-80 contêm um caractere alfabético seguido de um número de série para indicar as seções. Um

arquivo IGES possui seis partes, que são ilustradas na figura 3.16. Um exemplo de um arquivo IGES é ilustrado na figura 3.17.



3.16. Seções de um arquivo IGES

```

IGES file generated from an AutoCAD drawing by the IGES          S0000001
translator from Autodesk, Inc., translator version IGESOUT-3.04. S0000002
,,7HUNNAMED,29HD:\TXT\SIM\APOSTILA\FIG3_17.I,13HAutoCAD-12_c1,12HIGESOUTG0000001
-3.04,32,38,6,99,15,7HUNNAMED,1.0,1,4HINCH,32767,3.2767D1,13H980212.1614G0000002
22,9.0D-9,9.0,13HDENISE ANDREA,14H DENISE ANDREA,6,0;          G0000003
110 1 1 1 00000000D0000001
110 1 1 1 D0000002
124 2 1 1 00000000D0000003
124 1 1 0 D0000004
110 3 1 1 00010000D0000005
110 1 1 D0000006
110 4 1 1 00010000D0000007
110 1 1 D0000008
110 5 1 1 00010000D0000009
110 1 1 D0000010
110 6 1 1 00010000D0000011
110 1 1 D0000012
102 7 1 1 0 00000001D0000013
102 1 1 D0000014
110,4.0,7.0,0.0,9.0,6.0,0.0; 1P0000001
124,1.0,0.0,0.0,0.0,0.0,-1.0,0.0,0.0,0.0,-1.0,0.0; 3P0000002
110,5.0,5.0,0.0,5.0,2.0,0.0; 5P0000003
110,5.0,2.0,0.0,8.0,2.0,0.0; 7P0000004
110,8.0,2.0,0.0,8.0,5.0,0.0; 9P0000005
110,8.0,5.0,0.0,5.0,5.0,0.0; 11P0000006
102,4,5,7,9,11; 13P0000007
S0000002G0000003D0000014P0000007 T0000001

```

Figura 3.17. Exemplo de arquivo IGES, que inclui uma reta de (4,0;7,0) a (9,0;6,0), e um quadrado de lados = 3,0

Apesar do IGES ser uma interface largamente utilizada, ela tem muitos problemas. A versão 1.0 foi criticada devido ao seu tamanho e redundância enormes. Esse problema foi parcialmente solucionado na versão 2.0 através da introdução do formato binário. Entretanto, um problema existe devido às definições repetidas entre a seção de entrada de dados e a seção de dados sobre parâmetros, e além disso os arquivos não são muito legíveis.

Os pré e pós-processadores são freqüentemente de qualidade insuficiente porque as empresas que os fornecem procuram manter direitos de propriedade. Portanto uma combinação funcional de um-para-um entre as informações transferidas entre dois sistemas CAD não é freqüentemente obtida. Além disso, versões mais recentes do IGES também têm problemas. Por exemplo, a versão 3.0 não foi desenvolvida para apresentar informações sobre sólidos.

Para a avaliação da eficiência de interfaces, concebeu-se um conjunto de informações, e elas foram introduzidas num pós-processador (figura 3.18). Nota-se que as informações sobre a geometria são transmitidas corretamente, enquanto que as dimensões e texto foram perdidos.

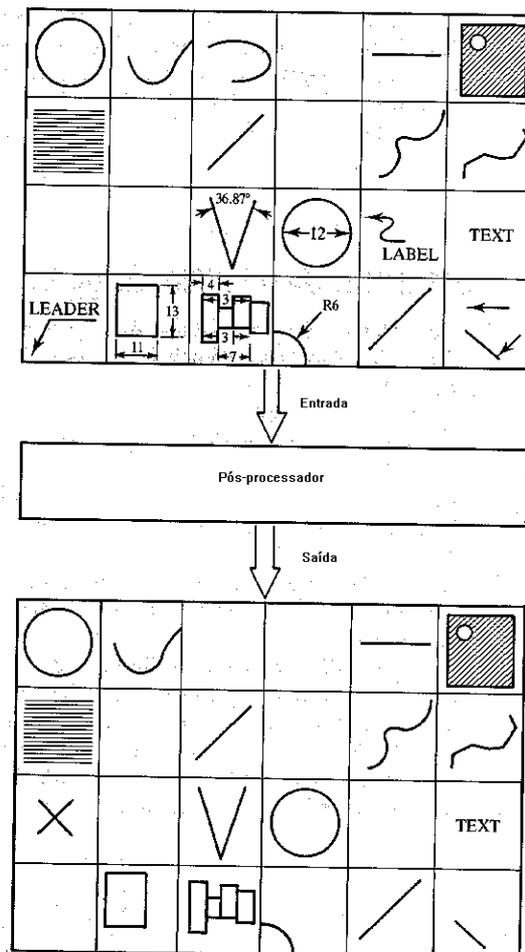


Figura 3.18. Avaliação de um pós-processador

STEP (“Standard for External Representation of Product Data)

O projeto STEP é um esforço internacional para desenvolver um padrão para representar um produto e um formato de troca de todas as informações sobre o ciclo de vida do produto. Em geral, ele é uma série de padrões com o objetivo de fornecer um mecanismo comum para representar dados de um produto independente de qualquer software de aplicação que possa vir a ser usado. Os princípios básicos do STEP estão ilustrados na figura 3.19. Nela vê-se um S.M.I.C. onde dados de CAD são

ligados através de uma interface do STEP às atividades principais de produção tais como CAP, PCP, CAM e CAQ.

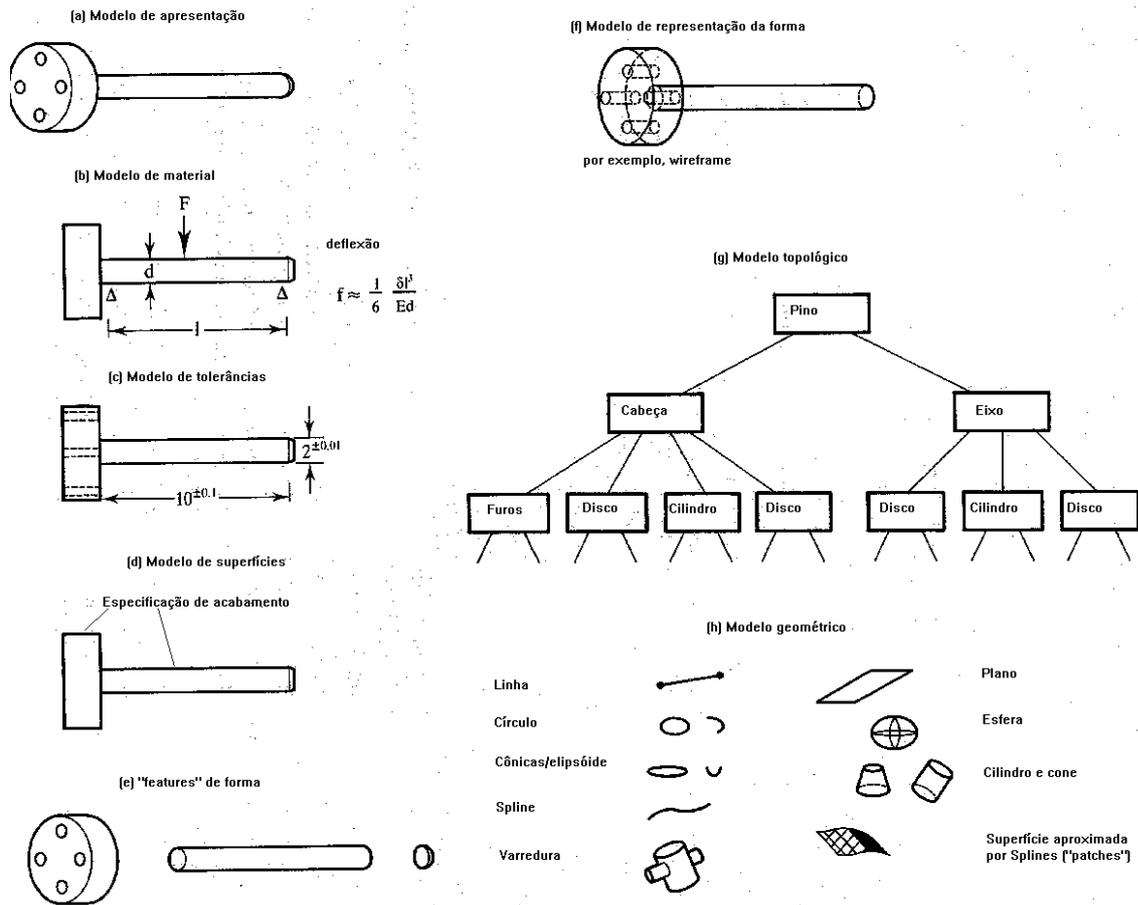


Figura 3.19. Modelos no STEP

Existem cinco componentes do padrão STEP:

- O primeiro componente discute o propósito do padrão. Ele contém:
 - Uma visão geral descrevendo a base de toda a norma;
 - EXPRESS, que é uma linguagem formal para especificar as estruturas de informação que são necessárias para definir o modelo do produto no STEP.
- O segundo componente define normas para a implementação do STEP
- O terceiro componente especifica a estrutura para testes de conformidade.
- Este componente inclui as normas para a modelagem do produto.
- Normas para o padrão específico de áreas técnicas. Estas normas baseiam-se em modelos descritos anteriormente. Categorias típicas dessas normas incluem: desenho, estrutura do produto, análise por elementos finitos, comportamento cinemático.

f) Protocolos de aplicação, que são usados para dar ao usuário uma certa liberdade, são ainda deixados abertos pelas normas acima. Os protocolos de aplicação são as referências finais a serem obedecidas (p.ex. versão 4 do STEP: troca de modelos B-rep).

Em princípio, o STEP é desenvolvido em três fases:

- camada da aplicação: a estrutura de informações orientada para a aplicação.
- camada lógica: a estrutura de informações é fornecida, através da qual os modelos da aplicação podem ser descritos com o auxílio da linguagem EXPRESS.
- camada física: os formatos de dados e arquivos são definidos.

A Linguagem EXPRESS

EXPRESS é uma linguagem formal que foi desenvolvida para ser usada no STEP. Ela tem similaridade sintática com Pascal e contém características de orientação a objetos. Um dos elementos mais importantes no EXPRESS é a entidade, a qual possui atributos que podem constituir uma entidade ou podem se derivar dela. Uma entidade pode também possuir restrições que definem a faixa de valores para os atributos.

Com EXPRESS uma especificação feita para STEP pode ser testada formalmente. Além disso EXPRESS fornece a base para ferramentas de software para a definição de dados do produto e a descrição de arquivos de dados. Um exemplo do uso de EXPRESS é mostrado abaixo.

```

*)
ENTITY cilindro_reto
SUBTYPE OF (primitiva_com_um_eixo);
raio      :real;
posicao    :axis 1_localizar;
altura    :real;
WHERE
WR1      : raio > 0;
WR2      : altura > 0;
END_ENTITY;
( *

```

EXIGÊNCIAS DE UM MODELO DE PRODUTO

Durante a fase de projeto, estabelece-se 70% ou mais do custo associado ao marketing do produto e ao modo como o produto se comporta ao longo do seu ciclo de vida. Questões do ciclo de vida incluem o projeto, planejamento de processos, manufatura, agendamento, compra de peças, montagem, inspeção, uso, manutenção, modernização e refugo. Dentre estes problemas, talvez o mais difícil é a configuração do produto para manufatura e montagem. O projetista deve considerar métodos de fabricação durante o projeto. Com o computador gradualmente substituindo o homem na geração do projeto, um sistema ideal de desenvolvimento do produto deve ser capaz de fornecer todas as informações necessárias para o projeto, fabricação e manutenção do produto.

“FEATURES”

Quando o planejamento para a fabricação é efetuado, seria muito interessante a geração dos processos de fabricação a partir das “features” de projeto. Na manufatura, uma “feature” é descrita como sendo uma configuração geométrica específica formada na superfície, aresta ou vértice de uma peça, com o objetivo de auxiliar numa dada função. Esta definição é suficiente para uma representação implícita de “features” num modelador, porém inadequada para o planejamento de processos. Por exemplo, na montagem, as “features” são responsáveis pelo modo como as peças são montadas. A definição acima também não esclarece uma definição matemática de “features”, que é vital no raciocínio sobre a interação geométrica entre “features”. Algumas definições de “features” incluem: “qualquer entidade com atributos tanto de forma quanto de função” (Dixon, 1988)²; “conjunto de informações sobre o produto, ou padrões de informação relacionados com a descrição de uma peça” (Shah, 1988)³; “conjunto de elementos geométricos que formam uma unidade de interesse” (Prinz et al, 1989)⁴.

CLASSIFICAÇÃO DE “FEATURES”

“Features” podem ser classificadas baseado nas características de engenharia dos domínios de aplicação. Mesmo assim, no mesmo domínio de aplicação, “features” podem ser classificadas diferentemente por diferentes usuários quando diferentes tipos de similaridade entre “features” estão presentes. Aqui as “features” são classificadas segundo três níveis: genérico, da aplicação e do produto (figura 3.20).

² J.R. Dixon, “Designing with Features: Building Manufacturing Knowledge into More Intelligent CAD Systems”, em Proceedings of the ASME Manufatrung International, Atlanta, EUA, 1988.

³ J.J. Shah, “Feature Transformations Between Application Specific Feature Spaces”, Computer-Aided Engineering, Vol. 5, No. 6, págs 247-255, 1988

⁴ F.B. Prinz, J.M. Pinilla e S. Finger, “Shape Feature Description and Recognition Using Augmented Topology Graph Grammar”, Reimpressões da Conferência da NSF Engineering Design Research, University of Massachussets at Amherst, págs 285-300, 1989.

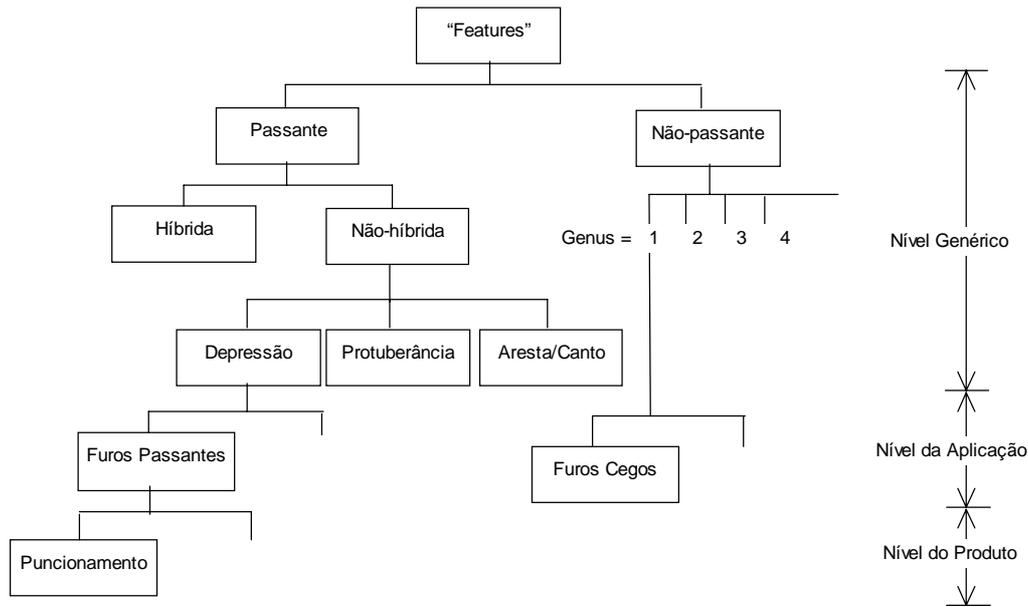


Figura 3.20. Os três níveis de classificação de “features”

Classificação Genérica de “Features”

A intenção de uma classificação explícita de “features” é fazê-la independente da aplicação. Portanto, efetua-se a classificação genérica para definir “features” por sua estrutura de contorno. Ela contém somente características topológicas e geométricas. Quatro atributos são usados para classificar as “features”: adjacência, genus (i.e. nº de anéis), convexidade e concavidade de arestas, e posições.

Classificação de “Features” pela Aplicação

No nível da aplicação (p.ex. chapas metálicas, montagem, usinagem), pode-se assumir a classificação genérica. Os atributos da aplicação da classe da “feature” serão adicionados para obter uma classificação geral (no nível da aplicação somente) das “features”. Isto é devido ao fato de que as “features” normalmente são definidas diferentemente por aplicações.

Montagem

Uma montagem é uma operação na qual dois ou mais objetos são colocados fisicamente em contato que reduz os GDL de cada um deles, e preserva tais relações permanentemente. Os conceitos de uma montagem são:

- simetria de “features”
- graus de liberdade ortogonais de “features” (as direções de aproximação ortogonais para montagem com respeito às “features”)
- complexidade de uma “feature”

Esses atributos são adicionados às classificações genéricas para obter a classificação completa de “features” para uma aplicação de montagem.

Simetria

Exemplos de simetria rotacional e reflectiva são ilustrados na figura 3.21.

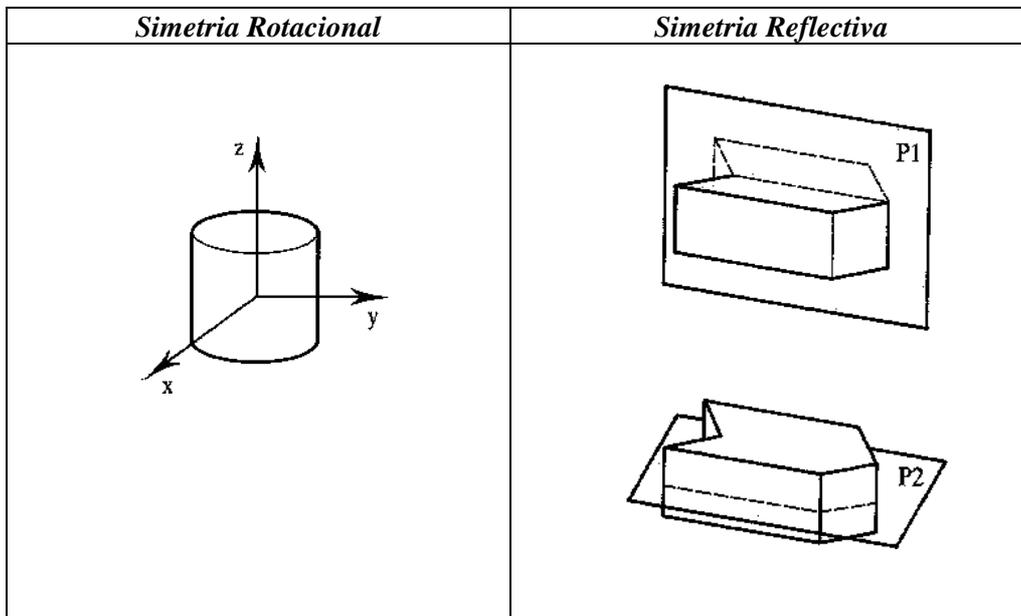


Figura 3.21. Simetrias rotacional e reflectiva

Metodologia de Classificação de Montagem

Antes de apresentar a classificação de uma montagem, duas questões devem ser discutidas. Primeiramente, deve-se definir o que é uma montagem, e também o tipo de informação necessária para efetuar um processo de montagem.

O que é uma montagem? A primeira exigência de uma montagem é que existam pelo menos dois objetos em cada passo do processo. Estes objetos devem ter contato físico entre si, e devem manter os seus relacionamentos espaciais mútuos após completar-se a montagem.

Depois de concluir-se o processo de montagem, cada objeto perderá pelo menos um GDL. Para dois objetos montados, o número de GDL perdidos para cada objeto deve ser igual. A figura 3.22 ilustra alguns exemplos onde os objetos estão em contato. Nos casos A e B tem-se uma situação de instabilidade devido à ação da gravidade, e portanto tais casos não são considerados como montagens válidas. No caso C, apenas um GDL permanecem após a montagem, e no caso D um GDL rotacional é preservado, enquanto um GDL translacional é diminuído para cada objeto.

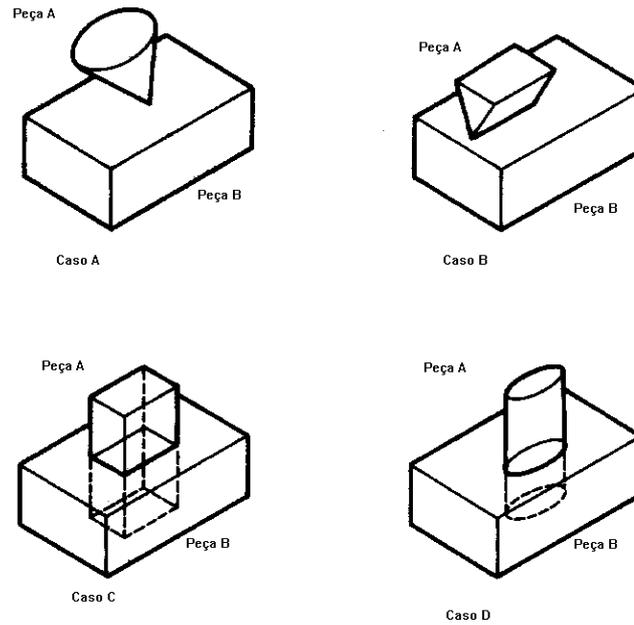


Figura 3.22. Objetos em contato durante a montagem

“Features” Implícitas de Montagem

A classificação de “features” para montagem consiste nos seguintes passos:

- Classificar as “features” em simétricas ou assimétricas.
- Determinar os GDL da “feature”. As “features” podem ser classificadas pelo número de GDL.
- Checar a complexidade de uma “feature”, e atribuir a “feature” a uma dada família.

Um exemplo de classificação é mostrado na figura 3.23.

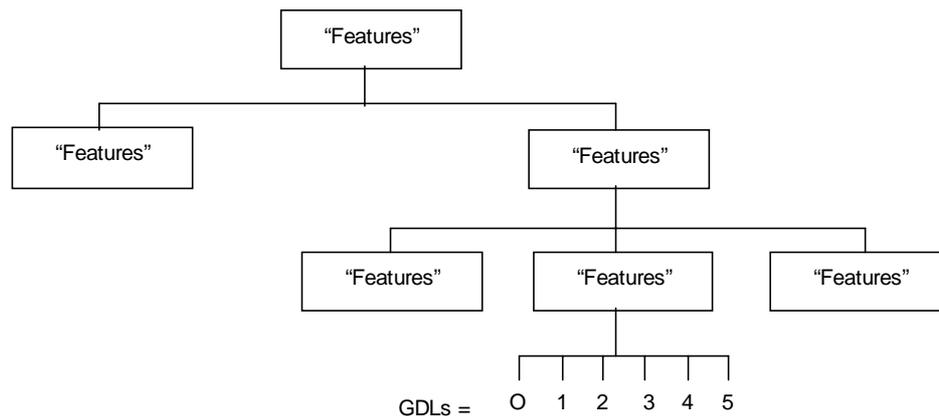


Figura 3.23. Classificação de “features” de montagem por grupos de simetria

CLASSIFICAÇÃO EM NÍVEL DO PRODUTO

A classificação em nível do produto é normalmente efetuada pelo usuário, onde ele/ela associa as “features” num domínio de aplicação aos seus usos ou funções. Do ponto de vista da manufatura, o uso de uma “feature” é frequentemente relacionado a quais ferramentas são utilizadas para fabricá-las. Por exemplo, numa aplicação de chapas metálicas, um furo pode ser fabricado por puncionamento e, portanto, existe uma correspondência entre a geometria da ferramenta e a “feature”. Na montagem, o mesmo furo poderia ter a função de combinar-se a uma “feature” de outra peça.

ENGENHARIA CONCORRENTE (SIMULTÂNEA)

Esforços recentes na indústria e laboratórios de pesquisa nos EUA, Europa e Japão têm tentado integrar o projeto com outras atividades no ciclo de vida do produto, como a manutenibilidade, manufaturabilidade, inspecionabilidade, etc. Isto significa que o projeto de um produto e do sistema de manufatura são executados simultaneamente.

A abordagem tradicional do projeto do produto e do processo é ilustrada na figura 3.24, onde pode ser notado que tais atividades são executadas seqüencialmente.

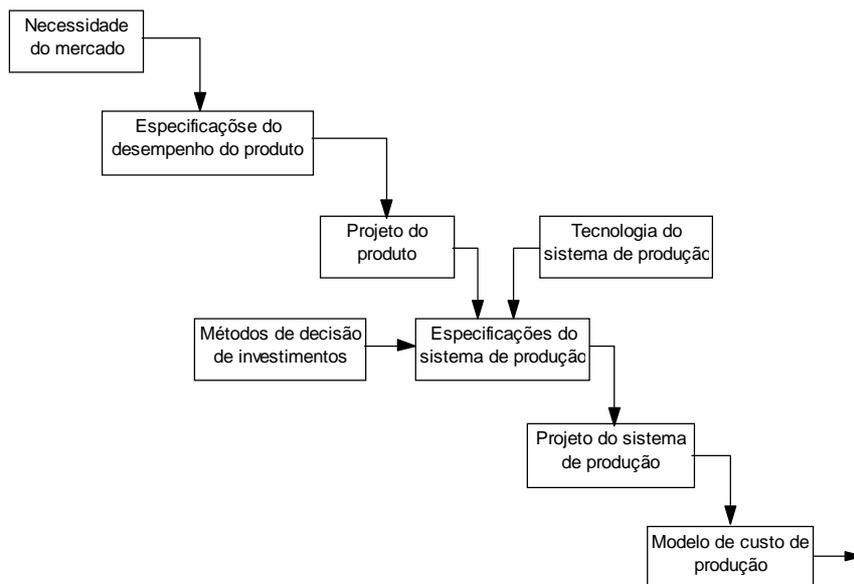


Figura 3.24. A abordagem tradicional do projeto do produto e do processo

A relação tradicional entre o projetista e o pessoal da manufatura tem sido sempre o de iniciador e o de implementador, respectivamente. Este relacionamento exige do projetista prescrever o que deve ser feito, sem levar em consideração se isto pode ser atingido. Portanto, projetos são criados e é a responsabilidade do engenheiro de manufatura (ou processista) determinar se e como o produto pode ser manufaturado. Se o produto viola regras de manufatura, então o ambiente de manufatura é reprojetoado para acomodar o novo produto, ou então efetua-se um reprojeto do produto solicitado pelos engenheiros de manufatura aos engenheiros de projeto. Violações podem ocorrer de várias

formas. Os equipamentos e ferramentas disponíveis podem ser incapazes de fabricar o produto conforme as tolerâncias exigidas, ou o custo geral para fabricar o produto pode estar acima do orçamento da empresa.

Deve-se lembrar que projetar um produto de tecnologia relativamente complexa requer muitas análises, investigação dos processos físicos básicos, verificações experimentais, etc.

A comunicação entre o projetista e o processista pode ser aumentada das seguintes maneiras:

- treinar o projetista em princípios de manufatura (p.ex. pode-se forçar o projetista a permanecer durante um período no chão de fábrica);
- tornando o engenheiro de manufatura um projetista;
- fazer com que o engenheiro de manufatura e o projetista trabalhem juntos durante o projeto do produto (trabalho em equipe - “*team approach*”).

As duas primeiras opções têm a dificuldade de que nenhum dos dois gostaria de assumir total responsabilidade pelo trabalho do outro. Portanto, parece menos complicado que eles poderiam trabalhar juntos para produzir o produto.

O estado da evolução da interação entre o projeto do produto e do processo é ilustrado na figura 3.25.

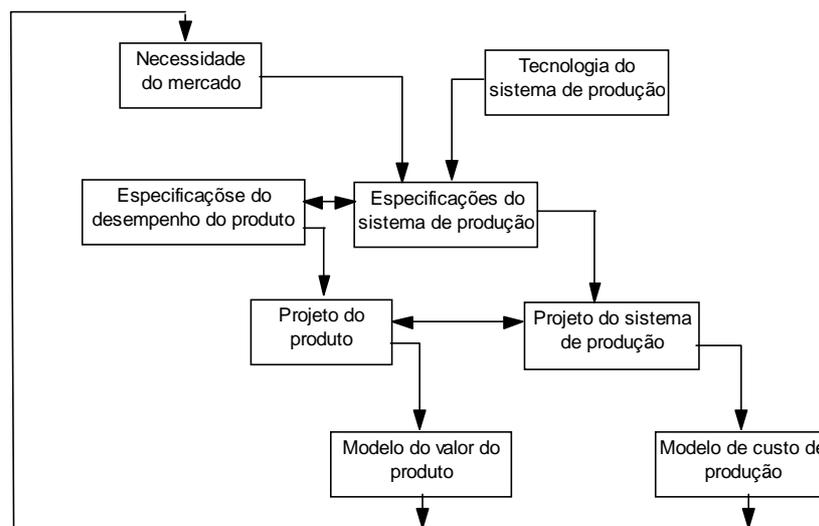


Figura 3.25. A estratégia para o projeto do produto e do processo de forma concorrente

O método de efetuar essa cooperação pode variar de empresa para empresa. Mas em geral o engenheiro de manufatura forneceria algumas regras de manufatura que tornar-se-iam restrições de projeto para ao projetista.

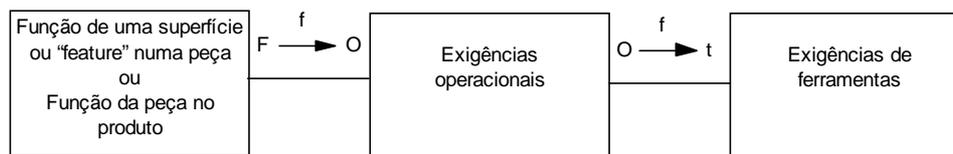
O projeto para a manufatura (DFM) requer a combinação das intenções do projetista com as exigências do engenheiro de manufatura para fabricar o produto. As intenções do projetista incluem as funções que o produto irá possuir, como:

- 1) Qual a função de uma dada “feature” na peça?

- 2) Qual operação está inferida por essa “feature”?
- 3) Qual ferramenta pode ser usada para fabricar essa “feature”?

Na realidade, o projetista é totalmente responsável pela resposta da pergunta (1). Ele comunica a responsabilidade de uma “feature” numa peça para consideração no ciclo de vida.

A pergunta (2) é parcialmente respondida pelo projetista e parcialmente pelo engenheiro de manufatura. Apesar dessa pergunta derivar parcialmente das intenções funcionais de uma peça ou “feature” com respeito ao seu uso intermediário e final em alguma peça ou produto, as exigências operacionais derivam significativamente das considerações geométricas e propriedades de materiais. Por exemplo, sabe-se que um furo a ser fabricado é uma prerrogativa do projetista, e sabe-se também que uma operação de furação resultará na configuração geométrica chamada de furo, e esta é uma consideração operacional que o engenheiro de manufatura estipula. O mesmo se aplica a tolerâncias. O engenheiro de manufatura responsabiliza-se pelo próximo passo, onde ele/ela estipula quais máquinas e/ou ferramentas podem ser usados para efetuar a furação, e estabelece não somente a seqüência de operações, mas também as exigências operacionais das ferramentas (figura 3.26).



onde: “F” = responsabilidade funcional da “feature”,
superfície ou peça
“O” = exigências operacionais
“f” = função de mapeamento
“t” = exigências de ferramentas

Figura 3.26. O mapeamento de uma “feature” para operações e ferramentas

Ao responder a pergunta (3), o engenheiro de manufatura leva em consideração as intenções do projetista, que podem incluir os objetivos funcionais temporários da “feature” bem como as exigências operacionais para fabricar a peça, para gerar um plano de processo factível que levará em conta as restrições de capacidade do ambiente de manufatura da empresa.

As regras básicas no DFM são as seguintes:

- 1) usar peças padronizadas sempre que possível;
- 2) tirar vantagem da forma geométrica do material a ser trabalhado para projetar as peças;
- 3) usar projetos anteriores sempre que possível;
- 4) minimizar a quantidade de usinagem sempre que possível;
- 5) durante o projeto da forma geométrica, considerar a facilidade de manuseio de material, fixação, usinagem e montagem;
- 6) evitar tolerâncias e acabamentos apertados;

7) considerar os princípios cinemáticos durante os passos iniciais do projeto.

Numa aplicação de montagem, o objetivo é projetar produtos que não somente sejam montáveis, mas também que resultem em custos mais baixos. Além disso, eles devem ser facilmente desmontáveis.

É essencial que na montagem seja considerada a variedade do produto, uma vez que ela influencia a produtividade. Se um produto não for projetado para acomodar as variações nas linhas de produto, então os custos vão aumentar devido à inflexibilidade. Além disso, como frequentes paradas e recomeços na produção devido a novas peças aumentam o custo e o tempo de produção, a variabilidade de peças deve ser menor. Portanto, a similaridade de peças bem como a minimização no número de peças necessárias para um produto deve ser um objetivo.

No projeto para montagem, quatro estágios importantes devem ser identificados, que são:

- 1) alimentação de peças;
- 2) orientação de peças;
- 3) apresentação de peças;
- 4) custo do sistema de manuseio.

Alguns desses problemas e possíveis soluções são ilustradas nas figuras 3.27 a 3.34.

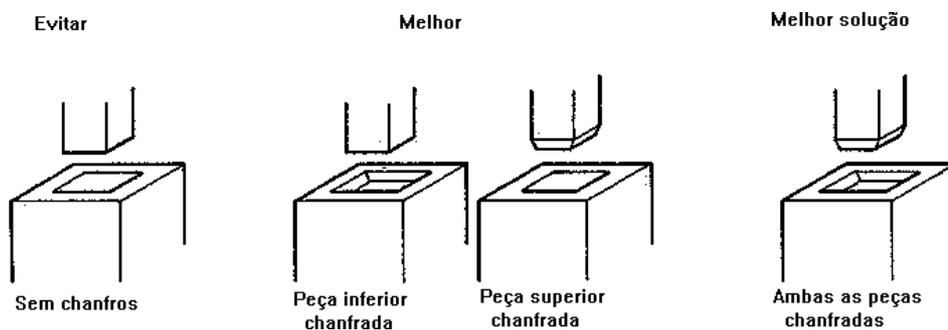


Figura 3.27. Concordância

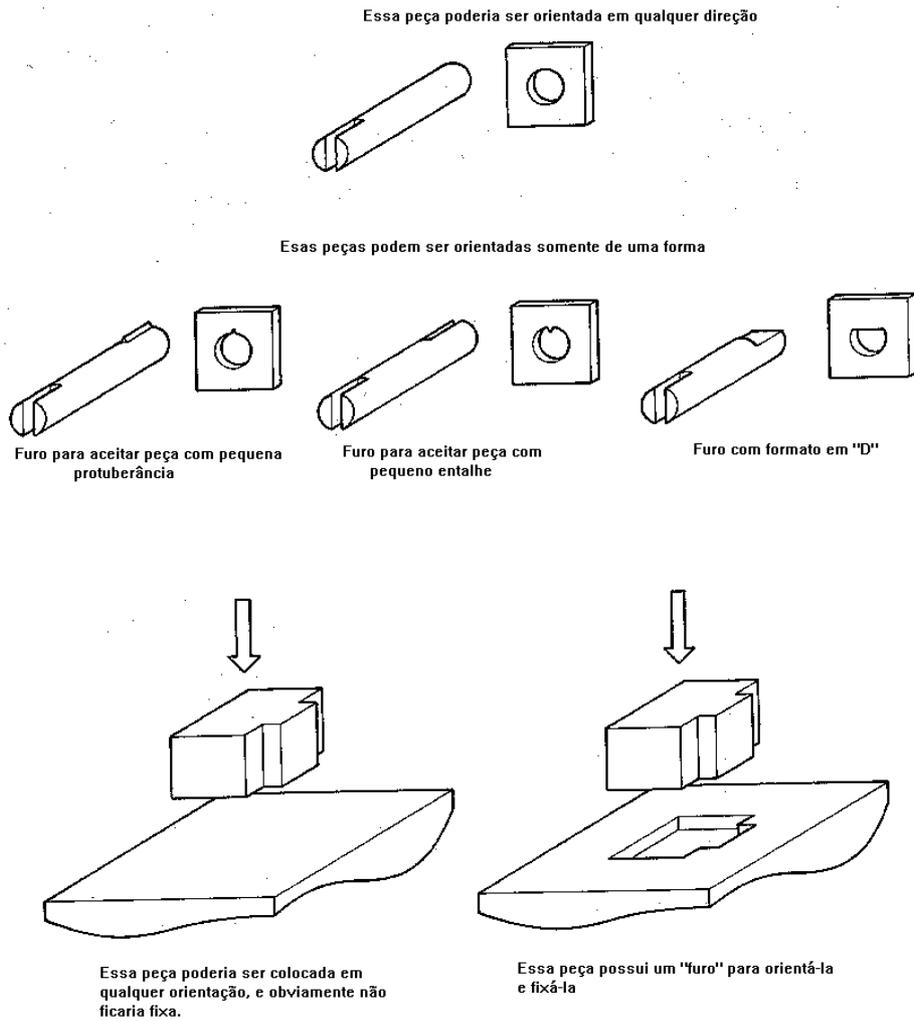


Figura 3.28. Auto-alinhamento de peças

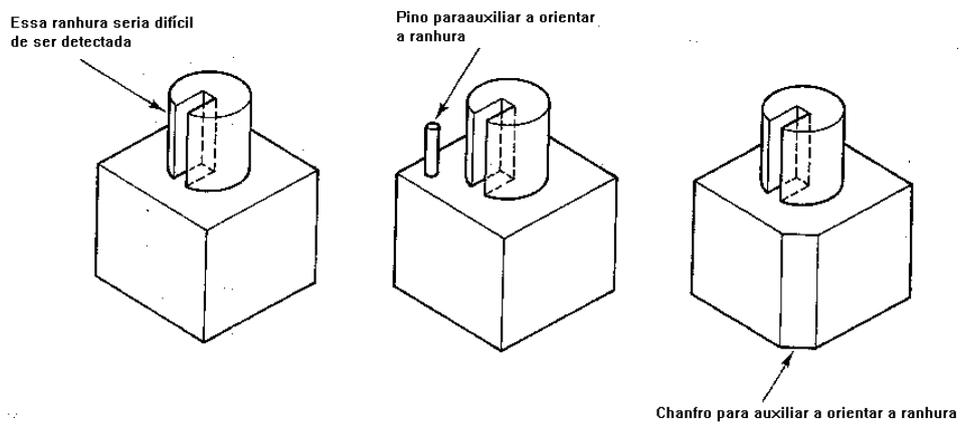


Figura 3.29. "Features" não-funcionais para ajudar a orientar uma peça

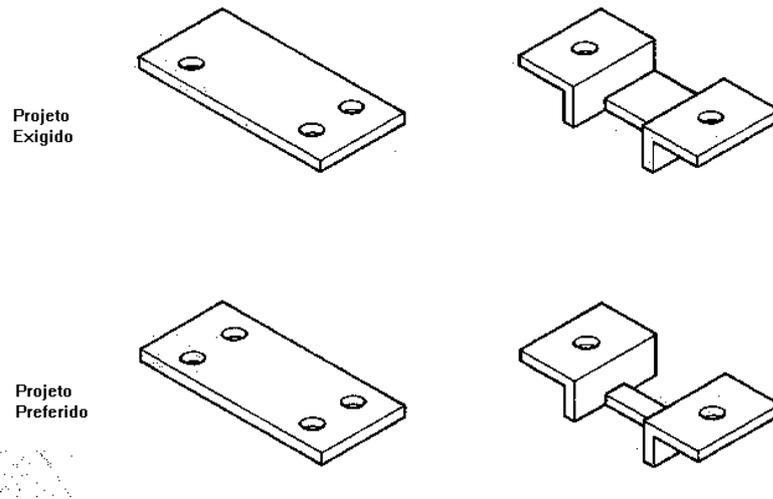


Figura 3.30. Exemplos de simetria

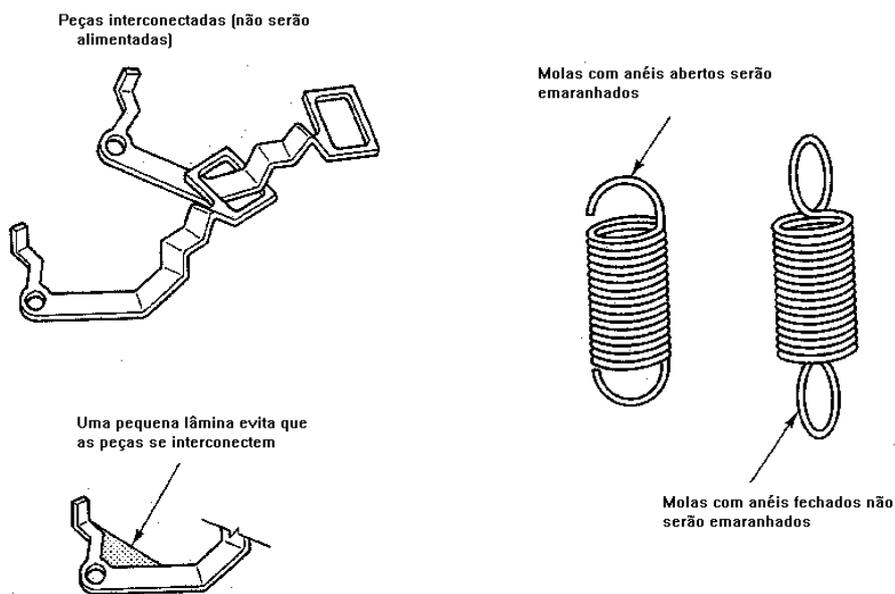
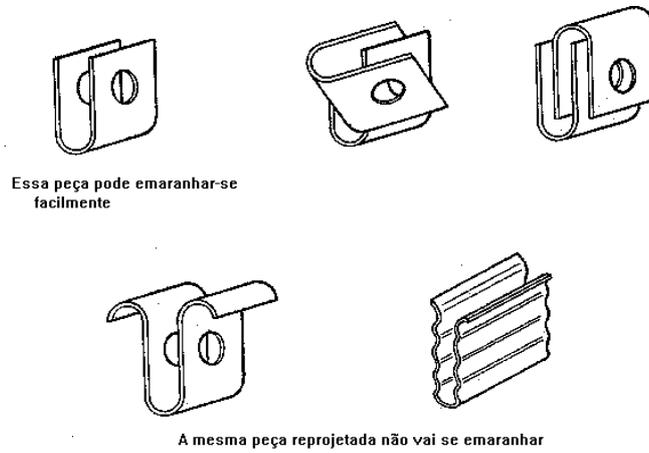


Figura 3.31. Emaranhado de peças

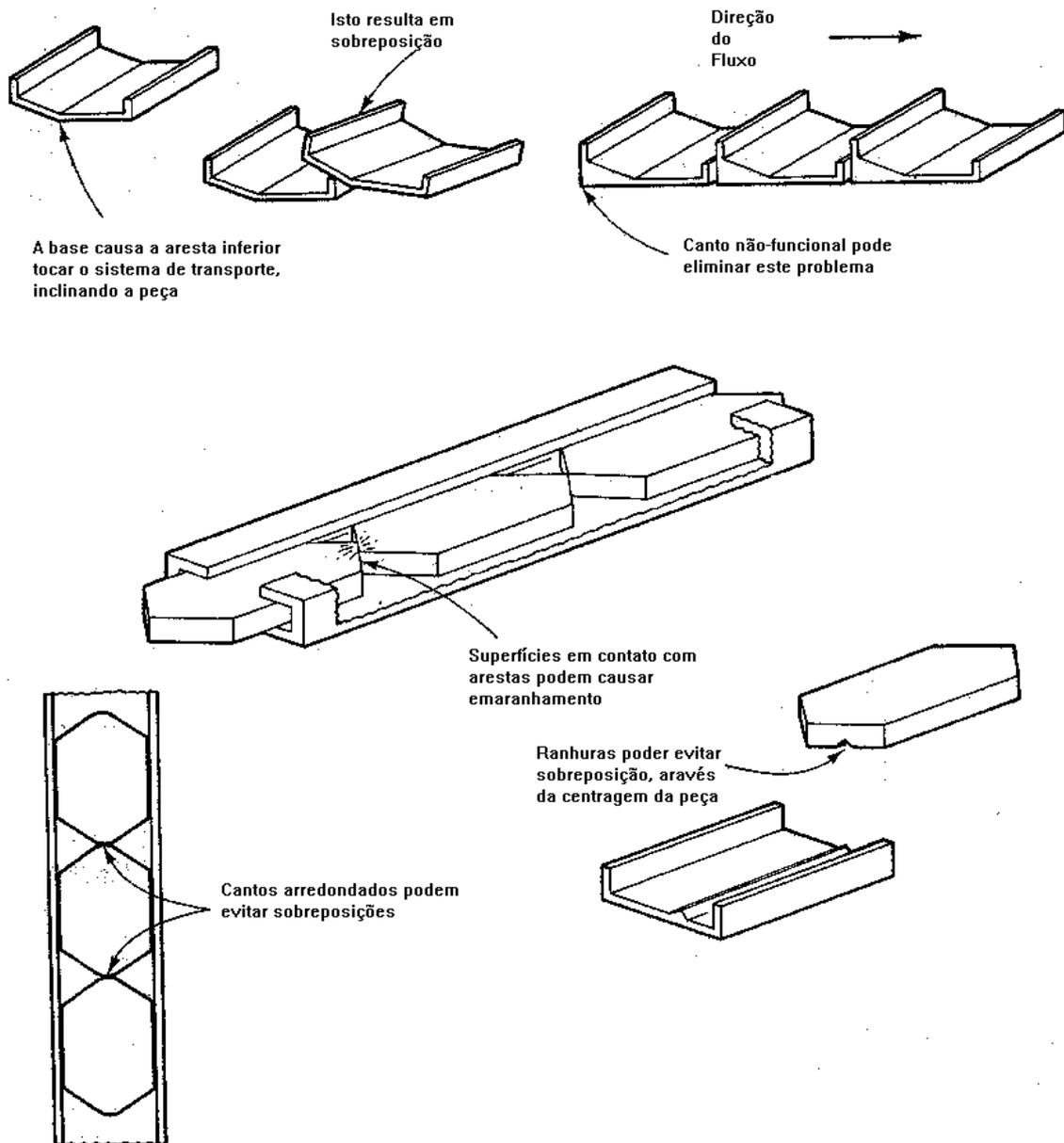
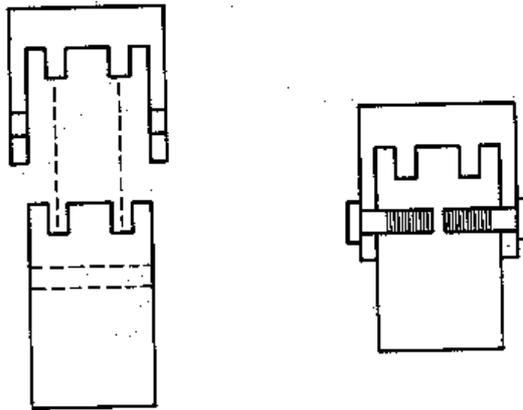


Figura 3.32. Método para evitar o bloqueio de peças

Evitar projetos que requerem fixadores



Projetar peças que se montem por "estalo"
('snap')

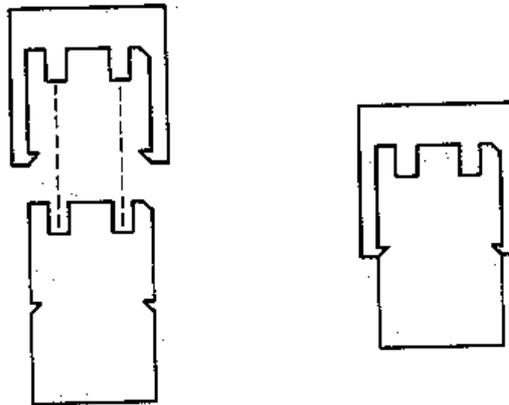
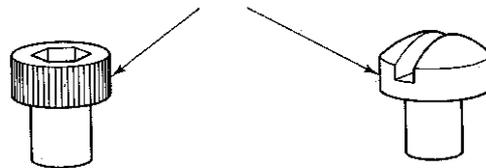


Figura 3.33. Substitutos de componentes de fixação

Preferido: lados verticais planos para movimentação por vácuo



Evitar:

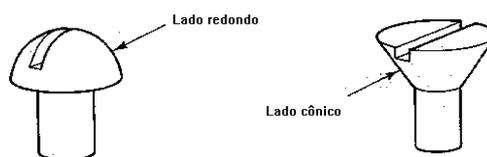


Figura 3.34. Elementos de fixação

Projeto Para a Manufatura e Montagem (DFMA)

O processo de DFMA consiste num procedimento passo-a-passo em que o projetista é questionado sobre a função da peça, limitações de materiais, e acessibilidade à peça durante a montagem. Existem softwares usados para DFMA, os quais calculam o tempo de montagem, custo do produto, e o número mínimo teórico de peças. Além disso, um módulo no software considera várias opções de materiais (p.ex. aço x plástico) e processos de manufatura (fundição x usinagem) para a produção mais econômica das peças.

O DFMA inicia com o projeto efetivo para a montagem. Quando os produtos são projetados para tornar a montagem mais fácil e rápida, os custos são reduzidos e produtos de melhor qualidade são obtidos. Dez regras (ou recomendações), listadas a seguir, são usadas por projetistas para criar produtos com boas características de montagem.

1. Minimizar o número de peças: Combinar ou eliminar peças sempre que possível. Combinar peças numa montagem que não se movem entre si, a menos que exista uma forte justificativa.
2. Minimizar as superfícies montadas: Reduzir as áreas de superfícies, que resulta na redução do processamento de superfícies.
3. Projetar para montagem de cima para baixo: Estabelecer uma peça base sobre a qual a montagem é feita, e efetuar a montagem em camadas acima da peça base. A inserção de peças de cima utiliza a gravidade e normalmente resulta em ferramental mais barato e menos dispositivos de fixação. Utilizar subconjuntos para evitar a violação dessa regra.
4. Melhorar acesso para montagem: Projetar para acesso fácil, visão desobstruída, e folga adequada para ferramental padronizado. Se possível, permitir que as peças sejam adicionadas para montagem através de camadas.
5. Maximizar a concordância entre as peças: Projetar com ranhuras adequadas e superfícies guia nas peças a serem montadas.
6. Maximizar a simetria das peças: Peças simétricas são mais fáceis de orientar e manusear. Onde a simetria não puder ser incluída, projetar com assimetria óbvia ou “features” de alinhamento.
7. Otimizar o manuseio das peças: Para um manuseio mais fácil, projetar peças que sejam rígidas em vez de flexíveis, tenham superfícies adequadas para aperto mecânico, e tenham obstáculos para evitar sobreposição, emaranhamento e travamento.
8. Evitar fixadores separados: Primeiro, fixadores devem ser eliminados usando-se p.ex. o “snap-fit”. Segundo, o número de fixadores separados devem ser reduzidos ao mínimo. Terceiro, os fixadores usados devem ser padronizados para reduzir a variação e assegurar a disponibilidade.
9. Fornecer peças com características de auto-fixação: Usar alças, dentes ou projeções sobre peças a serem montadas para identificar e manter a orientação até a montagem final.

10. Focalizar em projeto modular: Quando as peças tiverem uma função comum, usar uma peça ou módulo padrão; quando as peças devam ser intercambiáveis, usar uma interface comum ou padrão.

Tais regras são aplicadas à peça da figura 3.35.

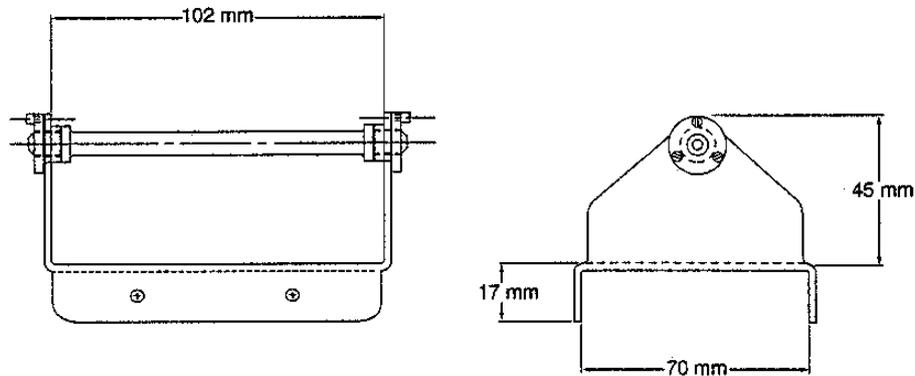


Figura 3.35. Exemplo de produto para o qual são aplicadas as 10 regras de montagem

Ao aplicar-se as 10 regras acima a esta peça, foram obtidos os seguintes resultados:

Regra 1 (violada): O número total de peças é igual a 10, com somente uma peça movendo-se na montagem. Sempre que duas peças montadas, tais como a braçadeira e as buchas, não se moverem entre si, todo esforço deve ser feito para combiná-las numa única peça.

Regra 2 (desconhecida): Com as informações fornecidas, não é possível determinar se alguma área da superfície poderia ser eliminada para reduzir o seu processamento, e satisfazer exigências de acabamento.

Regra 3 (violada): A peça possui uma base natural (a braçadeira de chapa metálica), sobre a qual a montagem é efetuada. A regra é violada, entretanto, porque as peças são montadas pelos lados e não por cima.

Regra 4 (satisfeita): O acesso às peças durante a montagem é adequado, e ferramentas padronizadas podem ser utilizadas.

Regra 5 (violada): Não há ranhuras ou guias alinhadas nas buchas para auxiliar no alinhamento dos furos para os parafusos.

Regra 6 (satisfeita): As peças são todas simétricas.

Regra 7 (violada): O parafuso não possui área adequada para fácil aperto.

Regra 8 (violada): Seis fixadores separados são usados na montagem.

Regra 9 (violada): Fixadores auto-travados não foram usados neste projeto.

Regra 10 (violada): Esta é provavelmente uma peça não padronizada.

O resultado da análise é que 7 regras foram violadas, duas foram satisfeitas e uma foi desconhecida. Portanto, este projeto deve ser melhorado em várias áreas.

Com relação ao suporte computacional, existem softwares de DFMA que auxiliam o projetista no cálculo do custo de soluções alternativas de projeto. O projetista introduz as especificações para o projeto da peça e o software fornece uma análise quantitativa dos projetos alternativos. Uma solução alternativa para o produto da figura 3.35 é ilustrada na figura 3.36. A necessidade de buchas foi eliminada fabricando-se a braçadeira inteiramente de nylon, resultando num produto com somente duas peças.

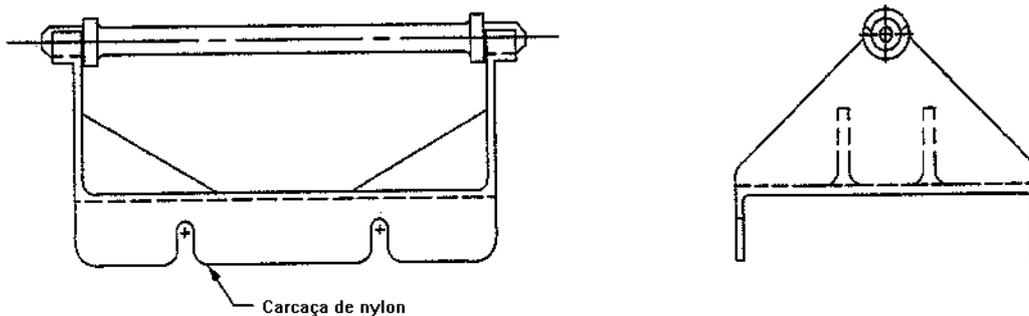


Figura 3.36. Projeto alternativo para o produto da figura 3.35

Um outro software foi usado para analisar estas duas alternativas de projeto, e na figura 3.37 ilustra-se a análise de custo destes dois projetos, fornecida pelo software de DFMA. Note que o custo inclui o ferramental, o material, a manufatura e a montagem.

<i>(a) Projeto usando a carcaça de chapa metálica</i>				
	<i>Montagem</i>	<i>Material</i>	<i>Manufatura</i>	<i>Ferramental</i>
<i>Carcaça</i>	0,02	1,74	1,56 ^a	7.830 ^b
<i>Bucha (2)</i>	0,09	0,01	0,06	9.030 ^c
<i>Parafuso (6)</i>	0,35	0,72	-	-
<i>Árvore</i>	0,04	0,26	1,29	-
Total	0,50	2,73	2,91	16.860

^a Inclui \$1,35 para furação e rosqueamento com macho dos furos.
^b Três matrizes separadas para puncionamento e dobramento.
^c Molde com dez cavidades para fabricação com mínimo custo

<i>(b) Projeto usando a carcaça feita por injeção de molde</i>				
	<i>Montagem</i>	<i>Material</i>	<i>Manufatura</i>	<i>Ferramental</i>
<i>Carcaça</i>	0,02	0,14	0,24	10.050 ^a
<i>Árvore</i>	0,02	0,26	1,29	-
Total	0,04	0,40	1,53	10.050

^a Molde com duas cavidades para fabricação com mínimo custo

Figura 3.37. Análise de custos feita por um software de DFMA para os produtos das figuras 3.35 e 3.36

PROTOTIPAGEM

Uma atividade importante no projeto de um produto e, por conseguinte, na Engenharia Simultânea, é a prototipagem, que tradicionalmente é efetuada na fase de avaliação. A construção de um protótipo é uma prática bastante antiga. Um protótipo é um modelo original de um projeto, construído para avaliar-se as características operacionais antes da produção efetiva do produto. O estilo dos protótipos é prescrito pelos testes que são planejados. Por exemplo, a indústria automotiva fabrica pequenos modelos de carros novos (com comprimento de cerca de 300 mm) de metal inteiriço ou madeira para testes aerodinâmicos em túnel de vento. A mesma indústria fabrica modelos completos em tamanho 1:1 de novos motores e sujeita-os a testes operacionais.

As ferramentas usadas para prototipagem padrão são as máquinas de produção convencionais. Frequentemente, peças protótipo são usinadas de metais não-ferrosos ou plástico; entretanto, com o uso de peças de injeção de plástico mais complexas nos produtos, o processo de prototipagem tornou-se mais difícil. A usinagem de formas complexas de peças injetadas em moldes é difícil, cara, e demorada. Enquanto a prototipagem de um projeto ainda é um processo fundamental de avaliação, a exigência de reduzir-se o lead-time para o mercado requer técnicas mais rápidas de prototipagem. Várias tecnologias, chamadas de *prototipagem rápida*, têm reduzido o tempo necessário no desenvolvimento de peças protótipo.

Prototipagem Rápida

A prototipagem rápida é uma técnica usada para fabricar-se uma amostra de novos projetos rapidamente, e é uma ferramenta confiável no processo de avaliação. Estas técnicas dividem eletronicamente um modelo 3-D em CAD de uma peça em seções transversais finas, e então transformam o projeto, camada por camada, num modelo físico ou protótipo.

Sistemas de prototipagem rápida atualmente são efetuados em workstations de alta capacidade. Iniciando-se com um arquivo de um sólido 3-D no CAD, este converte a geometria do sólido num formato de arquivo compatível com o sistema de prototipagem rápida. Por exemplo, o sistema de estereolitografia utiliza um formato “STL”. O software de conversão para o formato STL está disponível em todos os maiores softwares de CAD. Alguns dos sistemas de prototipagem rápida em uso atualmente são descritos a seguir.

Estereolitografia

Esse processo emprega um tanque com polímero líquido fotosensitivo com uma mesa controlada verticalmente imersa no polímero, e um laser servo-controlado focado na superfície do polímero (figura 3.38). A mesa é posicionada com a sua parte superior abaixo do tanque. O computador lê o arquivo STL correspondente à peça protótipo e corta a peça em seções transversais

de cima abaixo. As seções transversais são tipicamente de espessura entre 0,04mm e 0,13mm. Camadas mais finas são possíveis de serem obtidas (superfície mais suave), porém o tempo de processamento e fabricação é aumentado significativamente. O sistema computacional armazena os dados da seção transversal como arquivos “SLI” e combina-os para criar arquivos para controlar o mecanismo de elevação da mesa e o laser. O laser rastreia a área da seção transversal inferior na camada líquida fina do polímero na mesa: a luz do laser causa o polímero a endurecer. Com a primeira seção transversal da peça criada na mesa, o elevador é abaixado pelo computador para que uma outra camada de polímero cubra a seção transversal inferior. O laser então solidifica a próxima seção transversal. Este processo continua até que toda a peça seja obtida. O tempo de processamento é uma função da espessura da seção transversal, e o tamanho da área rastreada. Na média, o sistema processa uma camada de 25mm por hora para uma peça pequena. Depois que uma peça é fabricada nesse sistema, ela deve ser limpa totalmente e curada num forno para atingir a resistência do material.

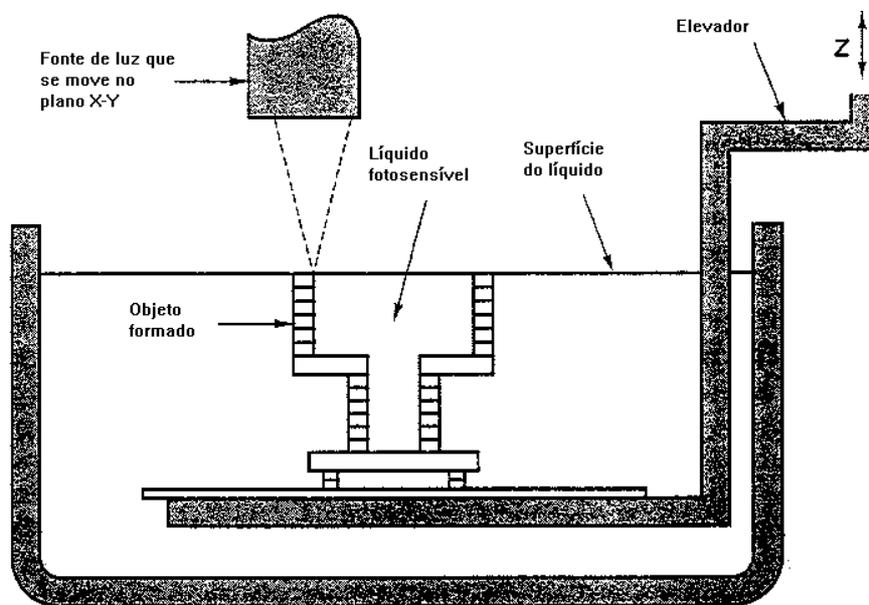


Figura 3.38. Sistema 3-D de estereolitografia

Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Este processo (SLS) emprega um laser de alta energia para fundir ou sinterizar pó num objeto sólido (figura 3.39). Usando técnica similar à estereolitografia, o SLS rastreia a forma de cada seção transversal, fundindo a camada fina de pó. Um rolo mecânico então espalha mais pó através do topo da camada acabada, e o laser rastreia a próxima seção transversal. Atualmente, sistemas SLS podem funcionar com três materiais: cêra, policarbonato e cloreto de vinil.

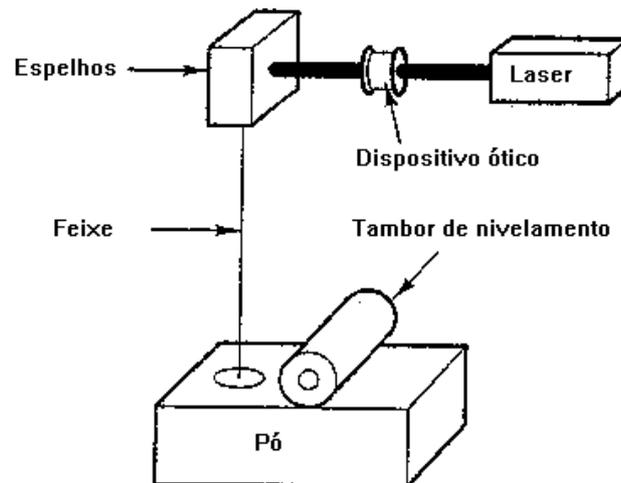


Figura 3.39. Sinterização seletiva a Laser

SLS tem a vantagem de que utiliza uma maior gama de materiais com melhores propriedades mecânicas do que os fotopolímeros e num custo menor. SLS funciona melhor em algumas peças com formas internas complexas, porém não atinge tolerâncias tão apertadas como a estereolitografia. Pequenas variações dimensionais podem ser obtidas. O acabamento de SLS de peças em PVC é bem suave, mas outros materiais exibem uma aparência laminada.

Modelagem por Deposição Fundida (FDM)

Este processo, ilustrado na figura 3.40, fabrica cada seção transversal movendo um fio fino de plástico ou cera acima da localização da peça, e aquecendo-o até o seu ponto de fusão. Uma vez mais, a peça é fabricada uma camada de cada vez. O processo é rápido e emprega materiais relativamente baratos. Este processo é muito mais rápido do que a estereolitografia. Algumas geometrias produzidas por FDM possuem uma aparência granular, e os materiais são limitados à cera e os semelhantes ao nylon.

Manufatura de Objetos Laminados (LOM)

No sistema LOM, as peças são fabricadas a partir de seções que são cortadas de folhas de matéria-prima. O material pode ser papel, plástico ou poliéster. Na fabricação da peça, cada folha é colada com adesivo à peça já construída, e então aparado com laser. LOM é 5 a 10 vezes mais rápido do que outros processos de prototipagem rápida porque o feixe de laser rastreia somente o perfil da cada camada, e não a área toda. Além disso, a produção de peças muito grandes é possível com uma precisão de $\pm 0,03\text{mm}$.

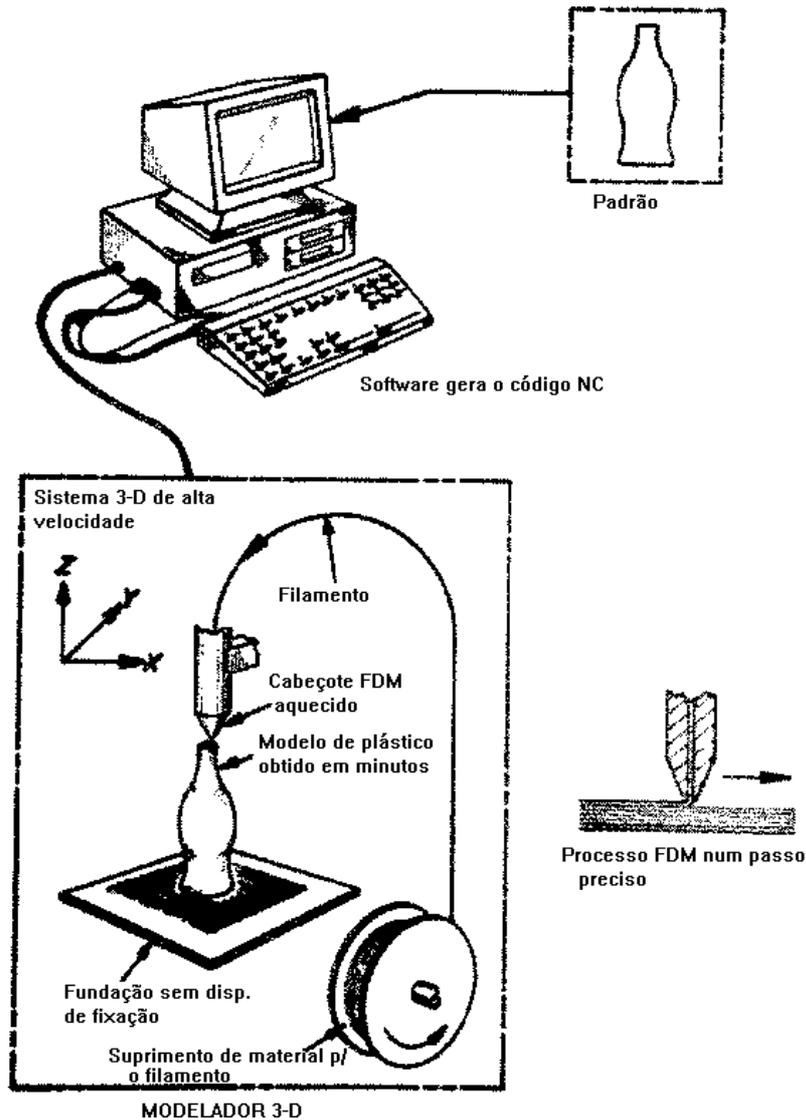


Figura 3.40. Modelagem por deposição fundida

O MODELADOR DE PRODUTO

Um modelador de produto deve ser capaz de criar um produto na engenharia, e a partir daí usar os elementos básicos do modelo ao longo do ciclo de vida da peça (ou produto). A figura 3.41 ilustra a arquitetura de um sistema modelador de produto.

O conceito de engenharia concorrente deve ser um dos objetivos de um modelador de produto. Áreas fundamentais de desenvolvimento ao longo da evolução do modelador são: a caracterização de “features”, permitindo o projeto por “features” e também a geração de planos de processo baseada em “features”; e o desenvolvimento de sistemas especialistas para a manufatura.

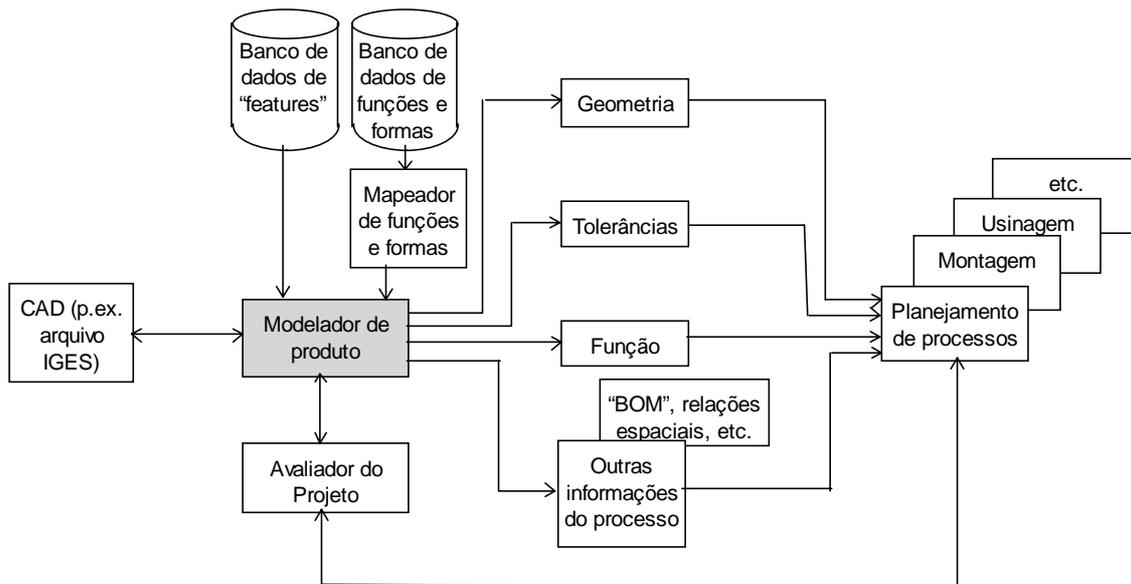


Figura 3.41. A arquitetura de um modelador de produto

Modelador da Montagem do Produto

Uma grande dificuldade no desenvolvimento do planejamento de processos para montagem é a perda de relações (ligações) entre as peças que estão montadas (isto é, a seqüência de montagem). Além disso, há a necessidade de gerar automaticamente informações fundamentais do processo de montagem diretamente pelo projetista.

Um sistema que busca solucionar os problemas acima, denominado de “Product Assembly Modeler” (PAM), foi desenvolvido por Nnaji (1990)⁵. Uma breve descrição do funcionamento do PAM é dada abaixo:

- 1) Um projetista usa um modelador (p.ex. CATIA, GEOMOD) para representar o produto.
- 2) O projetista inicia o modelo de montagem do produto que fornece uma lista de todas as peças que compõem o produto.
- 3) O sistema PAM fornece um sistema de menus através do qual as relações espaciais podem ser estabelecidas para cada par de peças. O sistema também rotula automaticamente as faces e “features” de cada peça.
- 4) O sistema então arbitrariamente escolhe uma peça da lista e exaustivamente combina cada uma das outras peças com ela. Cada par é apresentado na tela do computador em conjunto com uma lista de relações espaciais, tais como: ajustes, coplanares, alinhados, etc., que o projetista pode usar para estabelecer as relações que devem existir entre os dois objetos.

⁵ B.O. Nnaji, “CAD-Driven Machine Programming”, em Proceedings do Simpósio JAPAN-USA Automation and Robotics, Kyoto, Japão, 1990.

Além disso, tal sistema gera uma lista de materiais (“BOM”). Uma janela deste sistema é ilustrada na figura 3.42.

Este sistema baseia-se nas relações espaciais entre as peças sendo montadas. Enquanto estas relações espaciais são atribuídas (isto é, o usuário introduz essas informações no sistema), o sistema questiona o usuário sobre atributos tais como funções de ligação, tolerâncias de montagem, torque necessário para aperto, força de contato exercida em cada peça que sinaliza a parada do robô (usando informações advindas de sensores), etc.

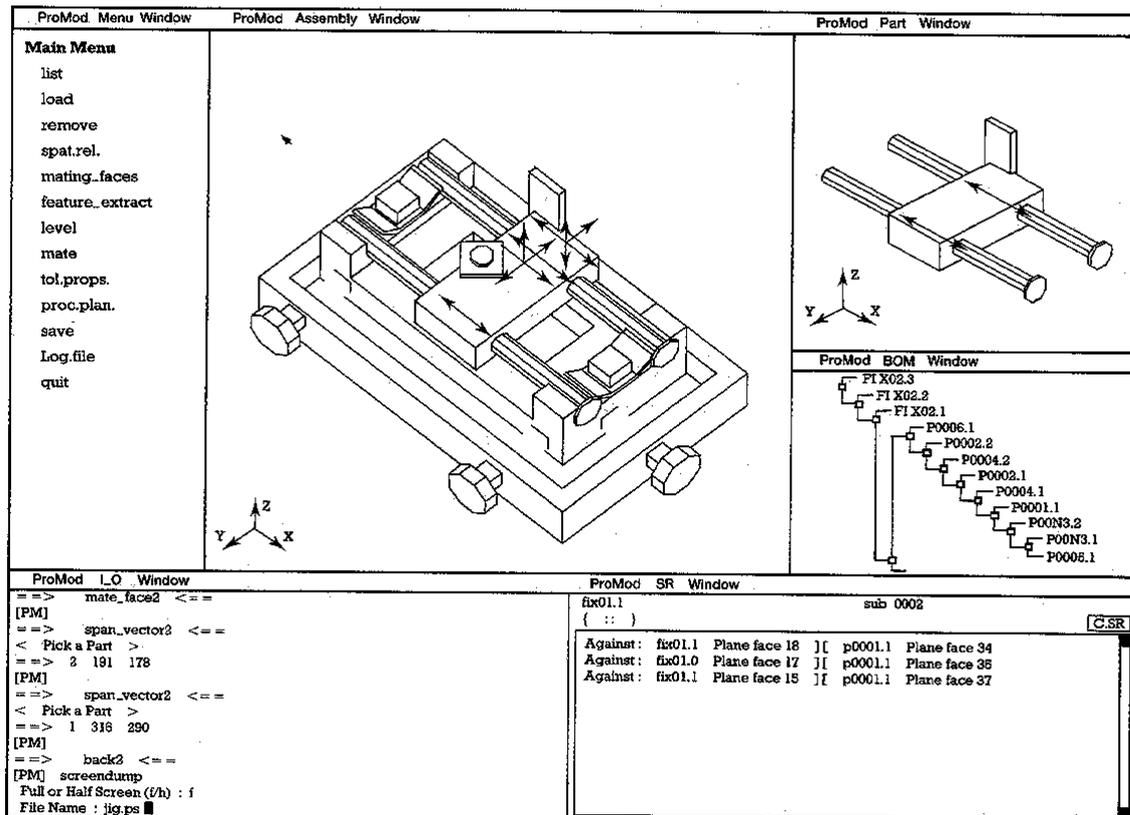


Figura 3.42. Modelador de montagem de produto

MÉTODOS DE QUALIDADE NO PROJETO

Engenharia de Valor

Um dos métodos mais antigos para reduzir o custo do produto mantendo a sua qualidade e função é a Engenharia de Valor. A intenção original era aplicar este conceito na empresa através de uma abordagem do tipo de equipes multidisciplinares. Ela difere da engenharia concorrente em que ela assume que um projeto está disponível e pode ser melhorado. Aplicações recentes da engenharia de valor tendem a focalizar componentes únicos, em vez de todo o produto. Este conceito usa uma sentença funcional formulada para avaliar se o item pode desempenhar a função num dado custo, com a economia de recursos financeiros sendo derivada da eliminação de algumas funções não-essenciais

ou por projeto. Os membros da equipe também contribuem decidindo o valor real de uma dada função, e busca-se efetuar uma melhoria nas funções que são mais caras.

Método Taguchi

Um outro método que é bem efetivo e que tem por objetivo a melhoria da qualidade é o método Taguchi. É um método de análise matemática que busca auxiliar o projetista a criar um produto que é produzido dentro de tolerâncias econômicas, com equipamentos econômicos e que ainda assim funciona como desejado. Existem vários elementos importantes identificados no projeto do produto. O primeiro é o projeto do sistema, que implica que o projeto conceitual do produto e análises de engenharia assegurem o perfeito funcionamento do produto. O segundo elemento é o projeto de parâmetros, que implica na seleção de dimensões e tolerâncias para que o produto possa ser produzido. O terceiro elemento é o projeto de tolerâncias que implica intensificar as especificações de desempenho dos materiais, peças e processos para que o produto funcione.

O projeto de sistemas neste método envolve mais do que o projeto conceitual. Ele envolve a separação dos fatores de projeto em fatores controláveis e não-controláveis (“ruído”). Os fatores controláveis são variáveis previsíveis, que podem ser obtidos em conformidade com os níveis desejados e tolerâncias (p.ex. peso). Fatores não-controláveis são frequentemente fúteis e caros de corrigir. O método sugere que os projetos de produto e processos devem focalizar no ruído o mais possível.

O projeto de parâmetros é uma tentativa de usar estatísticas para lidar com fatores não-previsíveis. Nisto, identifica-se os prováveis fatores de ruído e os fatores controláveis associados à função do produto. Um conjunto de experimentos é então projetado aplicando-se métodos estatísticos padronizados para determinar como os fatores controláveis e não-controláveis afetam o desempenho. É importante notar que as variáveis controláveis devem de fato ser controláveis durante os experimentos para esse esquema funcionar. Os resultados são então analisados para determinar quais combinações das variáveis controláveis produzem as menores variações nas variáveis não-controláveis. Tais combinações são as que são menos sensíveis e, portanto, são as escolhidas.