

CAPÍTULO IX

PROJETO PARA A MONTAGEM

9.1 - INTRODUÇÃO

O mercado atual caracteriza-se pela crescente demanda por produtos variados. Isto levou a redução do ciclo de vida dos produtos e forçou as indústrias a uma transição da produção em massa de poucos produtos, a uma produção menos volumosa de uma grande gama de produtos.

A redução do ciclo de vida dos produtos não somente exigiu um ciclo de projeto mais curto, como também uma abordagem mais flexível a todo o processo de desenvolvimento. Como exemplo deste fato, pode-se citar a diminuição dos lotes de fabricação e o aumento do número de variantes de produtos, que exigem uma resposta cada vez mais rápida dos processos. A automação dos desenhos e de partes do processo de projeto, através da utilização do CAD, levou a muitas melhorias, mas não reduziu suficientemente o ciclo projeto-manufatura (Little & Hemmings, 1996).

A obtenção de produtos diferenciados e com qualidade está fortemente relacionada com a eficiência operacional e a melhoria dos sistemas produtivos. Também, a qualidade não pode ser inserida num produto a não ser que seja projetada no mesmo.

A montagem é responsável por cerca de 50 a 75% de todo o custo gasto com a mão-de-obra para a fabricação de um produto (Baartman, 1997), e segundo Andreasen (1988) o tempo gasto com a montagem é de 40 a 60% do tempo total de fabricação da maior parte dos produtos. Levando-se em conta que muitos produtos manufaturados contêm uma alta proporção de montagem, pode-se concluir que a racionalização da montagem pode contribuir para a melhoria do desempenho de uma fábrica.

Essa melhoria é conseguida através da introdução de um processo de manufatura eficaz para produtos que necessitem montagem. A obtenção desta eficácia se dá através da integração entre o projeto do produto com ênfase na manufaturabilidade, projeto para montagem automatizada e desenvolvimento simultâneo dos sistemas de montagem. Outro ponto de fundamental importância para o alcance desta integração é trabalhar dentro da filosofia da engenharia simultânea, com grupos de trabalho multifuncionais e altamente motivados.

9.2 - MONTAGEM

Montagem pode ser definida como o ajuntamento de partes manufaturadas, formando um sistema completo, uma estrutura ou uma unidade de um sistema, ou seja, um produto final composto de partes conectadas. Montagem é a principal etapa na finalização do processo de produção. É um processo pelo qual um conjunto de operações efetuadas durante e após a fabricação, faz com que o produto gradualmente ganhe forma, através da união de componentes (peças) e submontagens (conjuntos de peças).

A montagem pode estar presente em diversas etapas do processo produtivo, sob a forma de submontagens, ou até mesmo após a entrega do produto ao cliente final (instalação

e/ou manutenção). Entretanto, na maioria dos casos, ela pode ser encarada como o desfecho do processo de fabricação.

Deve-se observar que o conceito de montagem não está restrito ao campo da mecânica. A indústria têxtil, eletrônica, moveleira e alimentícia, também possuem processos que podem ser classificados como montagem.

As montagens mecânicas podem ser constituídas por apenas duas peças (ex.: saleiro) ou milhares (ex.: automóvel). Estas podem ser pequenas, como as engrenagens de um relógio ou grandes, como as de um caminhão. Podem utilizar materiais como metal, madeira, borracha, papel, plástico, cerâmica ou uma combinação destes materiais. Quase todos os produtos domésticos e comerciais são de alguma maneira montagens mecânicas, em maior ou menor grau. Se a embalagem de um produto for considerada, são raros os casos que não possuem ao menos uma operação de montagem em seu processo de manufatura (Bralla, 1986).

Com relação ao tamanho e distribuição da produção, a montagem pode ser classificada como [Andr88]:

- *Montagem Única ou Limitada*: 1 a 5 exemplares por ano. Exemplos: moldes para fabricação, protótipos, navios;
- *Montagem Seriada*: montagem não contínua de mais de cinco exemplares por ano. Exemplos: motores elétricos de grande porte, máquinas-ferramenta, ferramentas especiais;
- *Montagem Contínua*: montagem de um produto e suas eventuais variantes ao longo do ano. Exemplos: carros, geladeiras, computadores.

9.3 - POR QUE MONTAR?

Existe uma série de razões através das quais a montagem se faz necessária. A principal delas é que todo produto visa atender a uma ou mais funções, que para serem integralmente desempenhadas, muitas vezes, requerem montagem. De uma maneira geral somente os produtos extremamente simples, como cliques para papel, copos de plástico, entre outros; não necessitam de montagem.

Outro fator predominante é relacionado à fabricação. Dependendo da complexidade da peça ou produto, é, economicamente vantajosa a divisão em duas ou mais peças de mais fácil fabricação. Neste caso a necessidade ou não da montagem (e o número de subdivisões), só pode ser determinada após uma detalhada análise do processo de montagem e demais processos de fabricação envolvidos.

A montagem geralmente se faz necessária quando existe a presença de um ou mais dos fatores listados a seguir (Andreasen, 1988). A figura 9.1 exemplifica alguns deles.

1. *Graus de Liberdade* (movimento): vários elementos devem possuir mobilidade para exercer a sua função (peças que devem ter movimento relativo entre si);
2. *Diferenciação de Materiais*: a realização da função e propriedades diferentes requerem materiais diferentes;
3. *Considerações de Manufatura*: algumas peças são mais fáceis e baratas de fabricar, se forem subdivididas em duas ou mais peças;
4. *Considerações de Instalação*: o produto pode requerer alguns tipos de montagens, durante a instalação, que só poderão ser realizadas no local de uso. As operações de manutenção também se enquadram neste item;

5. Diferenciação de Funções: uma função pode ser obtida através de um simples agente ou da combinação de vários na forma de mais elementos;
6. Condições Funcionais Particulares: elementos que necessitam de tarefas do tipo de inspeção, limpeza e acessibilidade; podem possuir divisões para facilitar a execução das mesmas;
7. Considerações de Projeto: requisitos estéticos podem causar a divisão da forma, solicitando uma montagem;
8. Considerações de Transporte: um produto pode ser desmembrado em partes para facilitar ou mesmo possibilitar seu transporte. É o caso de grandes equipamentos e sistemas que, depois de fabricados, deverão ser montados para que possam funcionar. Produtos frágeis, para maior proteção no transporte, também podem ser embalados semidesmontados.

Observando-se o limpador de pára-brisa de um veículo, Figura 9.1, é fácil identificar alguns dos fatores acima listados.

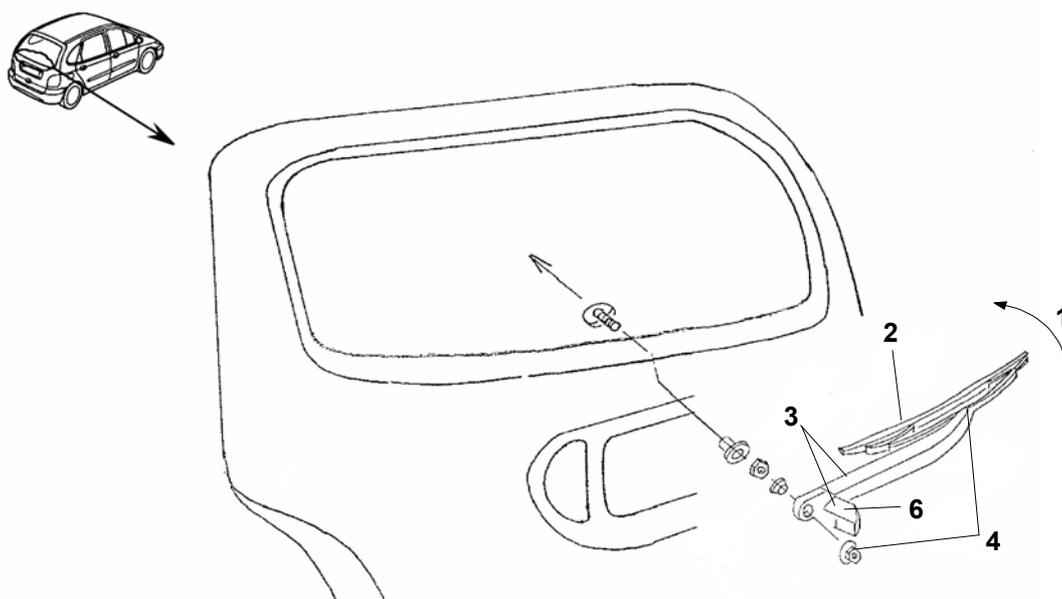


Figura 9.1 - Situações onde a montagem se faz necessária (Paupitz, 2000).

9.4 - O PROCESSO DE MONTAGEM

O processo de montagem não pode ser facilmente definido, principalmente porque cada tentativa de generalização das operações é dificultada com diversas exceções. A relação entre produto, processo de montagem e sistema de montagem é forte. Muitas conexões entre as peças requerem adaptações às operações e equipamentos de montagem, sendo que a definição destes itens é em grande parte definida durante a etapa de projeto do produto. Nesta seção, um esforço é feito no sentido de explicitar os fundamentos gerais de um processo de montagem.

9.4.1 - DIVISÃO DO PROCESSO DE MONTAGEM

A montagem de um produto é resultado de diversas etapas, onde em cada uma delas são realizadas operações de montagem em uma ordem pré-definida. É importante realizar uma diferenciação entre estas etapas e a montagem final, para os casos onde esta montagem final leva a variações no produto. Os dois conceitos podem ser definidos como (Andreasen, 1988):

Submontagem: operação individual de montagem onde um componente é montado com outro, em um componente base ou com um bloco de construção.

Montagem Final: descreve a construção de um produto acabado ou blocos de construção.

É comum integrar o processo de montagem com outros processos tais como: produção de componentes, teste, tratamentos superficiais, pintura, classificação, empacotamento, entre outros, conforme mostrado na figura 9.2. Isto se deve principalmente a vantagens de projeto e facilidades de manufatura.

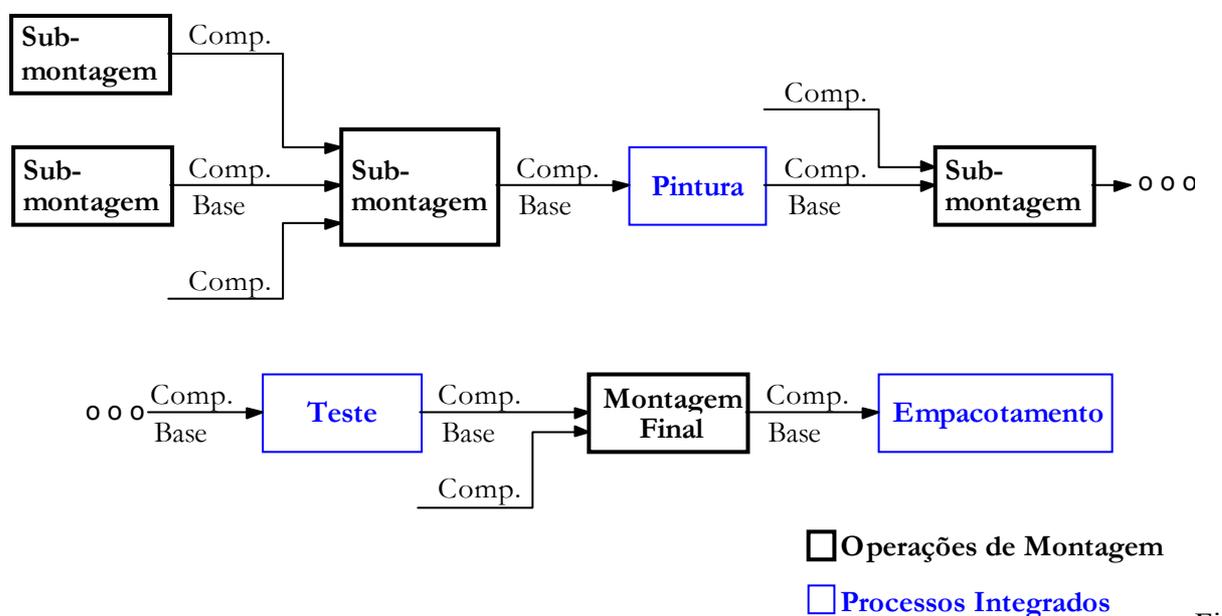


Figura 9.2 - Modelo generalizado do processo de montagem, incluindo alguns processos integrados (Adaptação das Figuras 3.5 e 3.6 de Andreasen (1988)).

9.4.2 - OPERAÇÕES DE MONTAGEM

O processo de montagem envolve o posicionamento e a união de uma ou mais peças. Muitas vezes, utilizam-se certos dispositivos para manipular as peças convenientemente ou para posicionar, precisamente, uma peça com relação à outra.

O processo de montagem pode ser dividido em três operações básicas: manipulação, composição e conferência, conforme ilustrado na figura 9.3. Cada uma delas pode ainda ser composta de uma série de outras operações, dentre as quais destacam-se armazenamento, transporte e posicionamento, conforme mostrado nas figuras 9.4 a 9.6 (Andreasen, 1988). Qualquer operação realizada durante a montagem será constituída de uma ou mais destas três operações básicas, ou de outras provenientes de processos integrados.

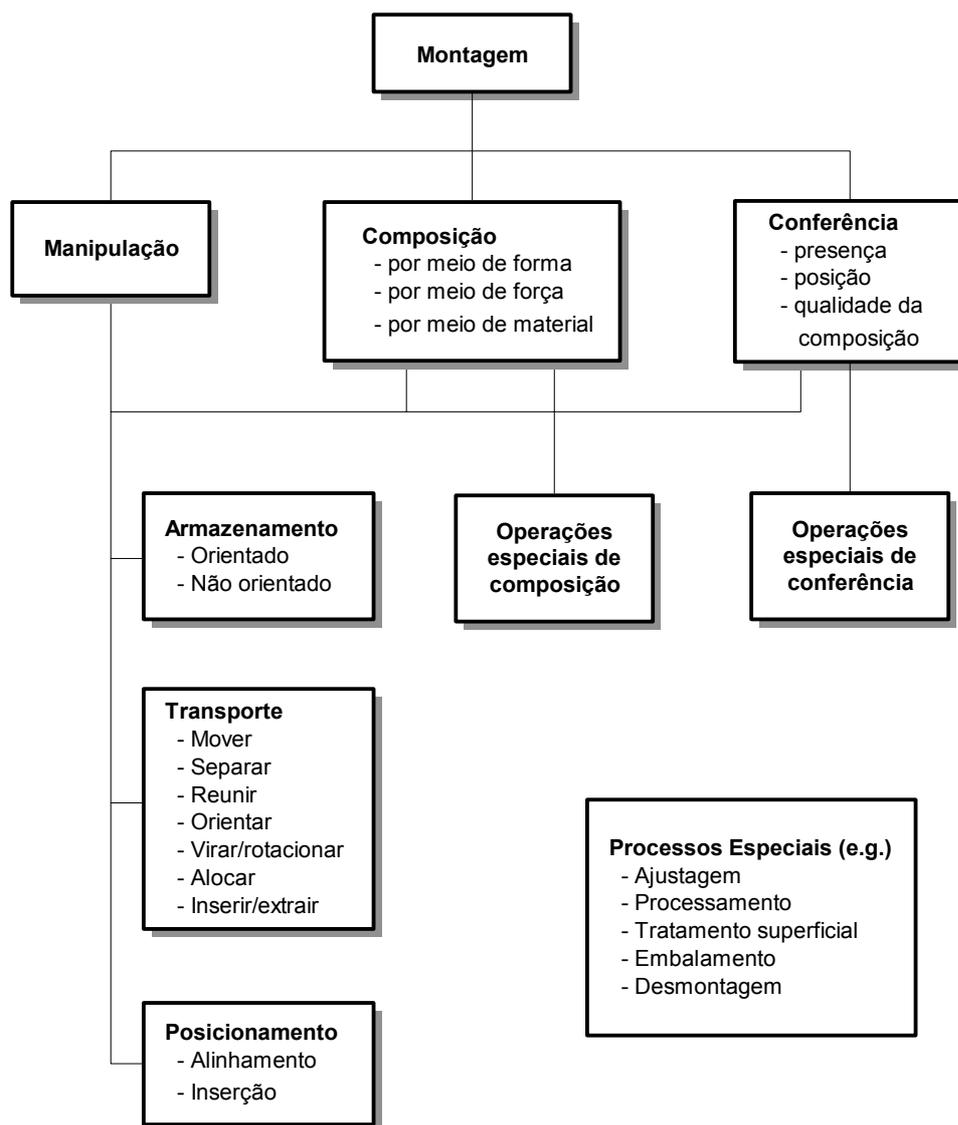


Figura 9.3 - Um processo de montagem é constituído das operações de manipulação, composição e conferência, assim como por processos especiais, se necessário. Estes processos podem ainda ser subdivididos em armazenamento, transporte e posicionamento, além de operações especiais conectadas a composição e conferência (Andreasen, 1988).

Andreasen (1988) define estas operações da seguinte maneira:

- **Manipulação:** é a função de colocar dois ou mais objetos em uma determinada posição. Constitui-se dos processos de seleção e preparação dos componentes para a composição ou conferência, e transporte para os sistemas de produção, montagem ou embalagem, subsequente.
- **Composição:** é a função que assegura este posicionamento, mesmo sob efeitos externos. O seu objetivo é criar uma conexão, relativamente permanente, entre os componentes. Abrange os métodos de união que podem ser classificados por meio de:
 - Forma: através de rebiteagem, rebordeamento, dobramento, acanalamento, chavetas, suportes, embutimentos, encaixes etc., formando uma união condicionalmente desmontável e com folgas (se apenas por forma).

- Força: com o auxílio de atrito ou força de campo (inércia, magnetismo), compreendendo a prensagem, o puncionamento, o esmagamento, o emperramento, o aparafusamento, o travamento, etc., formando uma união condicionalmente desmontável e livre de folgas.
- Material: através da força molecular, compreendendo a adesão (colagem, brasagem e calafetagem) e a coesão (soldagem e fundição), formando uma união não desmontável e livre de folgas.
- **Conferência:** é a função que verifica a qualidade do produto final e se as funções anteriores foram executadas segundo as especificações. Processo que confere a presença e posição dos componentes, em adição à qualidade do produto final. Pode-se ainda incluir manipulação e operações especiais de conferência (medição, comparação e rejeição). Dependendo do grau de automação, operações de medição e teste deverão ser realizadas, possivelmente entre operações individuais de montagem. Se operações adicionais de manipulação e composição são requeridas após a conferência, pode-se falar em ajustagem.

O processo de montagem envolve as seguintes operações:

Armazenamento. O armazenamento das partes a serem montadas, deve sempre que possível ser feito de maneira sistemática, de modo fácil e ordenado. Pode ser:

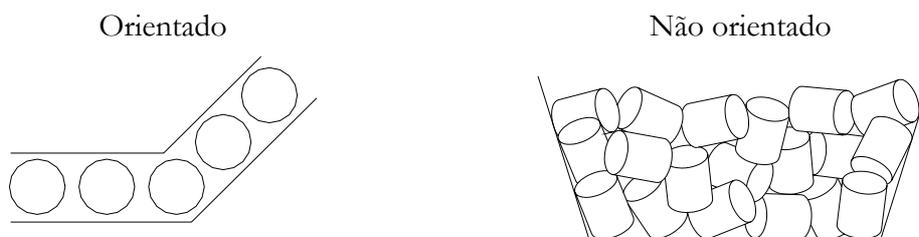
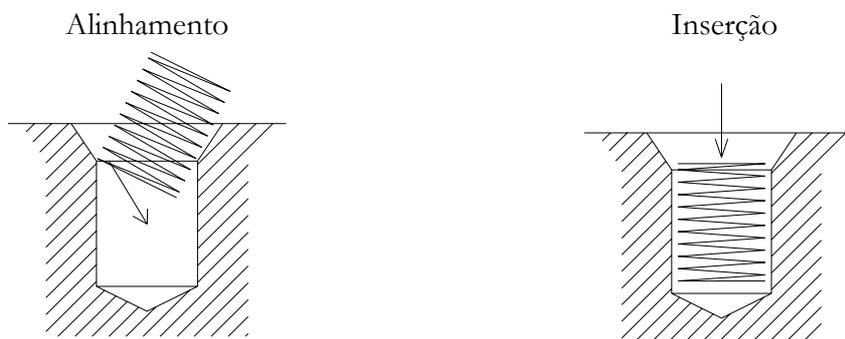


Fig. 9.4 - Formas possíveis de armazenamento de peças (Andreasen, 1988)

Posicionamento. Processo que compreende a orientação e o alinhamento de um componente em relação a outro.



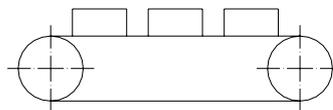
Posicionamento de um componente em uma ou mais direções axiais, em relação ao componente base.

Reposicionamento do componente em relação ao componente base, resultando na posição final.

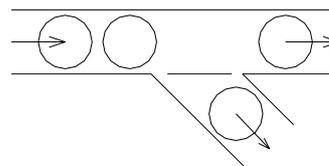
Fig. 9.5 - Operações de posicionamento de peças (Andreasen, 1988).

Manuseio. Envolve a *identificação* dos componentes, a *captação* destes e a sua *movimentação*. A movimentação ou transporte dos componentes do local de armazenamento até o local da montagem pode ocorrer de diferentes maneiras, de acordo com o processo de montagem.

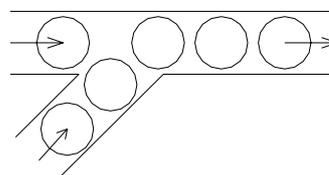
MOVER (Reposicionamento constante ou indexado dentro do sistema de montagem)



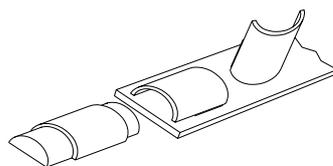
SEPARAR (Divisão de um fluxo simples de componentes em dois ou mais fluxos)



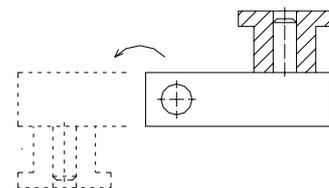
REUNIR (Reunião de dois ou mais fluxos de componentes)



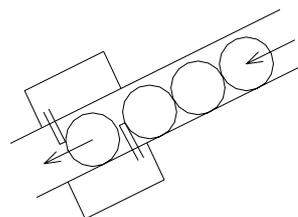
ORIENTAR (Orientação do fluxo de componentes em relação ao sistema)



VIBRAR/ROTACIONAR (Orientação dos componentes dentro de um fluxo em relação ao sistema)



ALOCAR (Liberação de determinado número de componentes de um fluxo para o sistema)



INSERIR/EXTRAIR (Posicionamento do componente em uma ferramenta; remoção do componente)

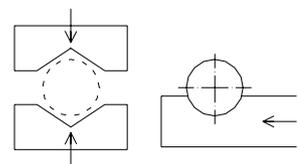


Fig. 9.6 - Operações de movimentação e transporte de componentes (Andreasen, 1988).

Outra abordagem para descrição das operações de montagem é apresentada por Baartman (1995). Nesta, a montagem é dividida em dois tipos de operações:

- *Operações Primárias*: diretamente agregam valor ao produto, em particular o manuseio e a conexão das partes.
- *Operações Secundárias*: devem ser executadas para que as operações primárias possam ser desempenhadas. Ex. armazenamento e transporte das peças e blocos de construção.

As operações primárias básicas para montar uma peça são descritas abaixo (Baartman, 1995):

- *Alimentar Montagem Fixa*: uma submontagem ou bloco é transportado para dentro da estação de trabalho;
- *Alimentar Peça*: a peça é transportada para dentro da estação de trabalho;
- *Teste do Estado Inicial*: a identificação e localização da peça e montagem devem ser conhecidas antes que a peça seja conectada a montagem. Isto frequentemente requer medições ou ajustes das localizações;
- *Açarrar Peça*: a peça é temporariamente conectada a uma ferramenta que auxilia a manipulá-la;
- *Mover Peça*: a peça é movida da localização inicial para o ponto final na montagem. Distinguem-se dois movimentos:
 - *Movimento Grosseiro*: a localização da peça é modificada, sem a introdução de contato com seu ambiente;
 - *Movimento Fino*: a localização da peça é modificada, enquanto que durante o movimento, a peça pode estar em contato com seu ambiente;
- *Conectar Peça*: operações adicionais que são requeridas para se fazer à união. Algumas conexões somente requerem movimentos finos. Os termos conectar, montar, unir, encaixar e acomodar são usados como sinônimos. Eles descrevem o processo de fazer uma conexão;
- *Soltar Peça*: a conexão temporária entre a peça e a ferramenta é desfeita;
- *Teste do Estado Final*: algumas vezes é necessário realizar medições para garantir que a peça esteja corretamente conectada a montagem;
- *Retirar Montagem*: a montagem fixa ou final é retirada da estação de trabalho.

Pode-se dizer que as operações secundárias estarão sempre presentes em uma montagem, mesmo que de uma maneira indireta. Um exemplo da importância destas operações dá-se nas linhas de montagem de produtos de médio e grande porte (automóveis, refrigeradores, motores elétricos). Nelas os operadores são obrigados a realizar freqüentes deslocamentos para buscar as peças que serão montadas e levá-las até o local de montagem. Nesta pesquisa as operações de logística, como armazenamento e transporte interno das peças, não são consideradas secundárias.

9.5 - SISTEMAS DE MONTAGEM

Ao contrário do que possa parecer, a racionalização da montagem não deve ser apenas encarada do ponto de vista do produto. É de suma importância a adequação do produto ao sistema de montagem, pois de nada adianta projetar um bom produto do ponto de vista da montagem, mas que não seja adequado ao sistema ou equipamento no qual ele será montado.

Esta seção procura explicitar as definições básicas sobre os diversos tipos de sistemas de montagem existentes e sua estruturação básica.

9.5.1 - DEFINIÇÃO E TIPOS DE SISTEMAS DE MONTAGEM

O conceito de sistema de montagem engloba a mão-de-obra, ferramentas, máquinas e equipamentos. Sua tarefa é transformar peças e componentes em um produto. Um conceito atual de sistema de montagem o descreve como sendo um componente de um elemento integrado, especialmente em conexão com a área de processo, conforme ilustrado na figura 9.7. Analisando esta figura, pode-se perceber que a determinação do melhor sistema de montagem depende de uma série de fatores como o produto, logística, estratégias da empresa e capital a ser empregado.

Andreasen (1988) definiu sistema de montagem como:

“O sistema de montagem é uma estrutura integrada de máquinas e operadores que executam a construção de subsistemas ou produtos acabados com características específicas, empregando componentes, ou se necessário, materiais disformes (cola, entre outros). Esta integração é atingida pela utilização de um processo onde as operações necessárias são integradas considerando-se material, energia e informação”.

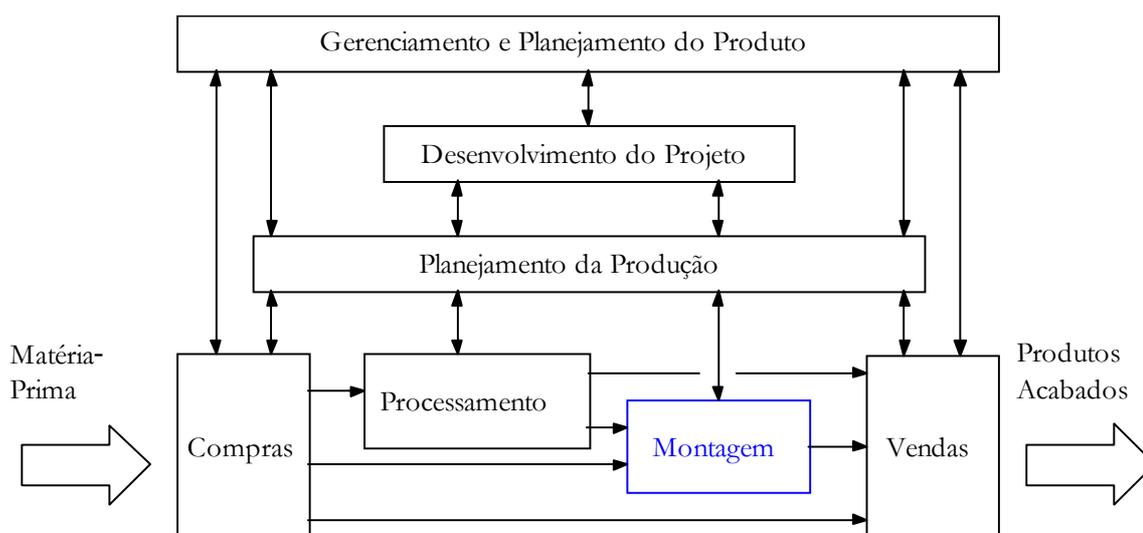


Figura 9.7 - Concepção do sistema de uma empresa, mostrando o relacionamento da montagem com outras funções (Andreasen, 1988).

Atualmente, nas indústrias, existe uma série de sistemas de montagem manuais, mecanizados e automatizados. Através desta divisão, pode-se classificar os diferentes tipos de sistemas de montagem quanto ao grau e tipo de mecanização, conforme descrito abaixo:

- *Montagem manual*: executada por um operário que dispõe de equipamentos auxiliares simples e passivos, tais como mesas, fixadores e ferramentas manuais.
- *Montagem mecanizada*: sistema de montagem composto por máquinas automáticas (geralmente dedicadas) e operadores, encarregados de executar certas operações, intercaladas ou não com as realizadas pelas máquinas.
- *Montagem automatizada*: composta de um sistema de equipamentos que seguem um programa lógico preestabelecido; onde as decisões tomadas são baseadas neste programa, no estado do sistema e nas suas entradas.

- *Montagem flexível*: quando o sistema de montagem permite variações de determinadas características do produto (geralmente em nível de componentes) através da modificação ou adaptação de algumas operações. A flexibilidade é uma característica que deve ser introduzida ao sistema, preferencialmente, durante o seu projeto. Ela também está relacionada à capacidade de adaptação do sistema a montagem de novas gerações de produtos. Baartman (1995) define cinco tipos de flexibilidade em sistemas de produção:
 - 1) Os componentes do sistema podem ser facilmente integrados em um novo sistema, e este pode ser facilmente programado para executar as novas atividades;
 - 2) O sistema rapidamente atinge as características de produção do projeto, após a sua primeira operação;
 - 3) O sistema é robusto (insensível) a variações de processo;
 - 4) O sistema pode ser facilmente modificado para a execução de uma nova atividade que tenha sido prevista em seu desenvolvimento, isto é, o tempo de troca é da ordem de segundos;
 - 5) O sistema pode ser facilmente modificado para a execução de novas atividades que não tenham sido previstas em seu desenvolvimento, isto é, o tempo de adaptação é da ordem de horas.

9.5.2 - BALANCEAMENTO DE SISTEMAS DE MONTAGEM

O balanceamento é uma das atividades mais importantes do gerenciamento de um sistema de montagem. O principal objetivo do balanceamento é alocar as atividades nas estações de trabalho, de maneira a homogeneizar os tempos de montagem entre as estações de trabalho. O ideal é que a taxa de utilização¹ de cada uma das estações de trabalho esteja próxima de 100%, e que não haja grande diferença entre os valores das mesmas. Como regra geral um desbalanceamento aceitável encontra-se entre 5 e 15%, mas estes valores servem apenas de base e podem variar de acordo com o produto e sistema de montagem a ser empregado.

O balanceamento de sistemas de montagem passa pela determinação dos seguintes problemas:

- Geração das seqüências de montagem;
- Tempo padrão para cada operação ou elemento de trabalho;
- Tempo de ciclo (baseado na produção esperada);
- Número de estações de trabalho ou estágios;
- Agrupamento das operações em uma mesma estação de trabalho.

A relevância do balanceamento está na otimização do tempo de montagem e na melhor utilização dos recursos disponíveis. O balanceamento geralmente é realizado com base nos dados de estimativas de vendas, de tal forma que em um período de tempo predeterminado, se possa atingir o volume de produção desejado com o melhor aproveitamento possível dos recursos. Além disto, o balanceamento também vem sendo utilizado como uma ferramenta de verificação do progresso contínuo.

O balanceamento possui uma forte ligação com o PSM, já que é um fator importante na etapa de escolha da seqüência de montagem a ser adotada. Pode-se dizer que se não houver

¹ Taxa de utilização (TU): este termo refere-se ao quociente formado entre o tempo de ciclo da estação de trabalho (t_{ce}) e o tempo de ciclo do sistema (t_c):

$$TU = \frac{t_{ce}}{t_c}.$$

outros critérios (como a ergonomia, restrições de produto, geométricas e de processo), na quase totalidade dos casos, a seqüência de montagem escolhida será a que proporcionar o melhor balanceamento.

O problema mais básico é o da produção em massa de um único produto em um sistema de montagem. Entretanto, sabe-se que esta situação raramente ocorre, e o que geralmente encontra-se nas indústrias é a produção de pequenos lotes de diversos modelos ou famílias de produtos, em um mesmo sistema de montagem. Este problema é extremamente complexo e pode ser resolvido de diversas maneiras. Para sua completa resolução, além das informações acima explicitadas, pode ser necessário conhecer aspectos tecnológicos ou a estrutura do sistema de montagem (caso já exista um).

Como se pode perceber, o ponto de partida para a resolução deste problema é a geração das seqüências de montagem e a escolha da(s) melhor(es), o que ressalta ainda mais a importância deste estudo.

Os tempos padrão podem ser determinados através de cronoanálise, caso já exista pelo menos um protótipo do produto. Para produtos novos que ainda encontram-se na fase de projeto e estudos de tempos e movimentos, pode-se utilizar métodos especiais, como os baseados na decomposição dos movimentos do operador. Dentre eles pode-se destacar: MTM (“method time measurement”), Work Factor, BMT (“basic motion timestudy”), DMT (“dimensional motion times”) e o MODAPTS (“modular arrangement of predetermined time standard”). O MTM é o mais conhecido, sendo que muitas empresas desenvolvem seus próprios métodos baseados nos acima descritos e no tipo de atividade desenvolvida.

O agrupamento das operações em uma mesma estação de trabalho objetiva minimizar o tempo de espera das estações de trabalho, ou seja, homogeneizar ao máximo seus tempos de operação. Ele deve ser realizado respeitando-se as seqüências anteriormente determinadas e as possíveis limitações (como espaço disponível, recursos humanos e equipamentos). Uma abordagem que vem sendo atualmente utilizada é deixar as últimas estações de trabalho menos sobrecarregadas para que possam realizar possíveis retoques ou operações de controle.

2.5.3 - CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS DE MONTAGEM

Com relação à configuração, os sistemas podem ser classificados como:

⇒ Sistemas de Montagem em Série

- O produto em montagem passa de uma estação de trabalho para a outra, e cada estação é responsável pela realização de uma ou mais operações;
- O tempo de ciclo (t_c) é a soma do tempo de transporte (t_T) entre duas estações de trabalho com o tempo da estação com maior taxa de utilização ou gargalo³ (t_{eg});

$$t_c = t_{eg} + t_T \quad (9.1)$$

- A probabilidade do sistema funcionar (D_{sist}) é o produto da probabilidade de cada estação (D_n) [Andr88];

$$D_{sist} = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n \quad (9.2)$$

- Já que um balanceamento perfeito é impossível, e, portanto apenas uma meta que auxilia o melhoramento contínuo, na prática considera-se aceitável um desbalanceamento de 5 a 15 % entre as estações de trabalho;

³ Estação gargalo: é a estação cuja(s) operação(ões) demanda(m) o maior tempo de ciclo.

- O fornecimento de material ao sistema é simplificado, já que as operações pouco variam e são realizadas nas mesmas estações de trabalho;
- Nesta configuração o trabalho tende a ser monótono já que os operadores ficam “presos” aos postos de trabalho e realizam sempre as mesmas atividades em um pequeno intervalo de tempo;
- Quando não se dispõe de “buffers”⁴, a falha em qualquer ponto do sistema significa uma parada total. Em outras palavras, a utilização de “buffers” aumenta a confiabilidade do sistema. Apesar disto, a sua utilização aumenta a necessidade de capital de giro, custo de manutenção de estoques e velocidade de montagem.

⇒ Sistemas de Montagem em Paralelo

- As estações de trabalho são dispostas em paralelo e realizam as mesmas operações em diversos pontos do sistema;
- O tempo de ciclo é a soma do tempo de uma estação de trabalho com o tempo de transporte;
- A probabilidade do sistema funcionar (D_{sist}), é a probabilidade de todas as estações não trabalharem simultaneamente (Andreassen, 1988);

$$D_{sist} = 1 - (1 - D_1)(1 - D_2) \dots (1 - D_n) \quad (9.3)$$

- O balanceamento é realizado com o objetivo de determinar o número de estações de trabalho paralelas, visando atingir o volume de produção requerido;
- O fornecimento de material ao sistema é dificultado, já que um ou mais componentes devem ser distribuídos em duas ou mais estações de trabalho;
- Menor índice de fadiga dos operadores que o anterior e maior flexibilidade no caso de faltas e ausências temporárias.

Estas duas classificações são básicas, e na maioria dos casos o que se utiliza é uma combinação destes conceitos sob a forma de outras categorias de sistemas de montagem, como as apresentadas a seguir.

⇒ Linhas de Montagem

Um sistema é classificado como uma linha de montagem quando cada estação de trabalho recebe as atividades na mesma seqüência e executam operações idênticas em todas as peças. As linhas de montagem dedicadas são as mais simples da categoria e são úteis para atingir um baixo custo de montagem, quando se trata de grandes volumes de produção com baixa variabilidade.

As linhas de montagem possuem flexibilidade relativamente baixa, porque, mesmo que a omissão de operações seja possível, não existe flexibilidade no direcionamento do material em processo. As estações de trabalho são geralmente conectadas por transportadores de correias ou taliscas, que liberam a montagem para a estação subsequente somente quando ela está pronta para recebê-la (isto se a linha não for contínua). Um novo trabalho de montagem só pode entrar no sistema quando a primeira estação estiver vazia, veja a figura 9.8.

⁴ Buffer: nada mais é do que um estoque intermediário, geralmente posicionado entre duas estações de trabalho.

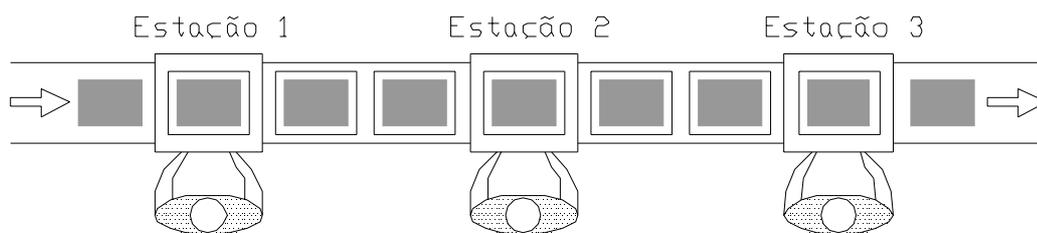


Figura 9.8 - Leiaute conceitual de uma linha de montagem em série.

Nos casos onde as estações de trabalho puderem ser adaptadas para desempenhar as operações em diferentes tipos de produtos (usualmente dentro de uma mesma família de produtos), a linha de montagem é chamada de não dedicada. Nestas linhas um controle adicional no fornecimento de material faz-se necessário. A maior dificuldade apresentada na sua operação é encontrar uma seqüência de montagem comum, que efetivamente utilize cada estação de trabalho sem causar sobrecarga em algum ponto.

As linhas de montagem flexíveis são um desenvolvimento mais recente. Cada estação de trabalho possui equipamentos de montagem que são idênticos em termos de capacidade e velocidade, e que podem desempenhar uma série de operações em vários produtos. Estas estações são conectadas por um sistema de transporte/manuseio não síncrono, que permite um certo grau de flexibilidade no roteamento entre os equipamentos de montagem em cada estação.

O balanceamento de cada estação de trabalho é um requisito deste tipo de linha de montagem. Ela só pode liberar o trabalho de montagem se o próximo “buffer” possuir uma posição livre ou a montagem puder ser realizada. A figura 9.9 traz o leiaute conceitual de uma linha de montagem flexível. A lógica de controle necessária para este sequenciamento requer equipamento e gastos adicionais.

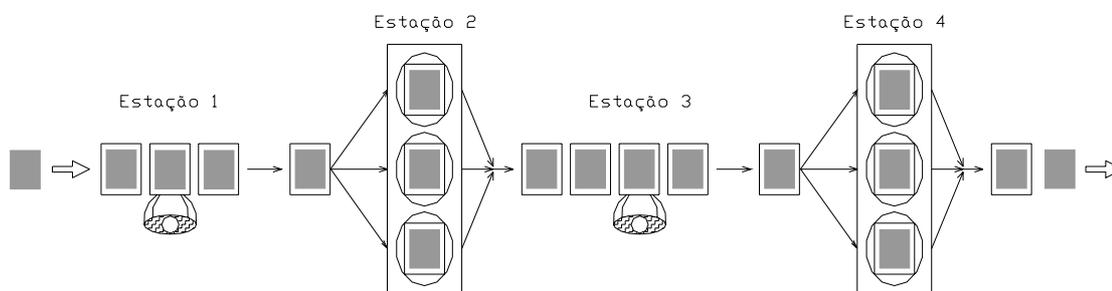


Figura 9.9 - Leiaute conceitual de uma linha de montagem flexível (Adaptação da Figura 2 de Little (1996)).

⇒ **Células de Montagem Flexíveis**

Na manufatura de pequenos e médios volumes, onde exista uma certa variabilidade no que tange a modelos ou famílias de produtos, uma certa semelhança no processamento pode ser identificada. Nestes casos pode-se construir células com determinados equipamentos ou estações de montagem, formando um leiaute de tecnologia de grupo.

As células de montagem flexíveis compreendem um certo número de estações de montagem automatizadas, interconectadas por dispositivos de transporte/manuseio de materiais (isto no caso de células totalmente automatizadas). A flexibilidade do sistema está na sua capacidade de processar diferentes submontagens simultaneamente em diferentes estações de trabalho, até que sejam reunidas em algum estágio posterior para montagem. O tempo de troca

entre operações é desprezível. Este tipo de célula de montagem é usada para médios volumes de produção e montagem de diversos tipos de produtos, cujo tamanho pode variar de pequeno a médio.

Existem vários tipos de configuração das células, cada qual com características de montagem diferentes. Algumas células possuem estações múltiplas que podem realizar operações de montagem em uma variedade de peças. Outras atuam de maneira similar às células de manufatura flexível⁵, onde a montagem é tratada como um processo multi-estágio, e as peças movem-se em uma rota pré-definida através das diferentes estações para o processamento (Vide figura 9.10).

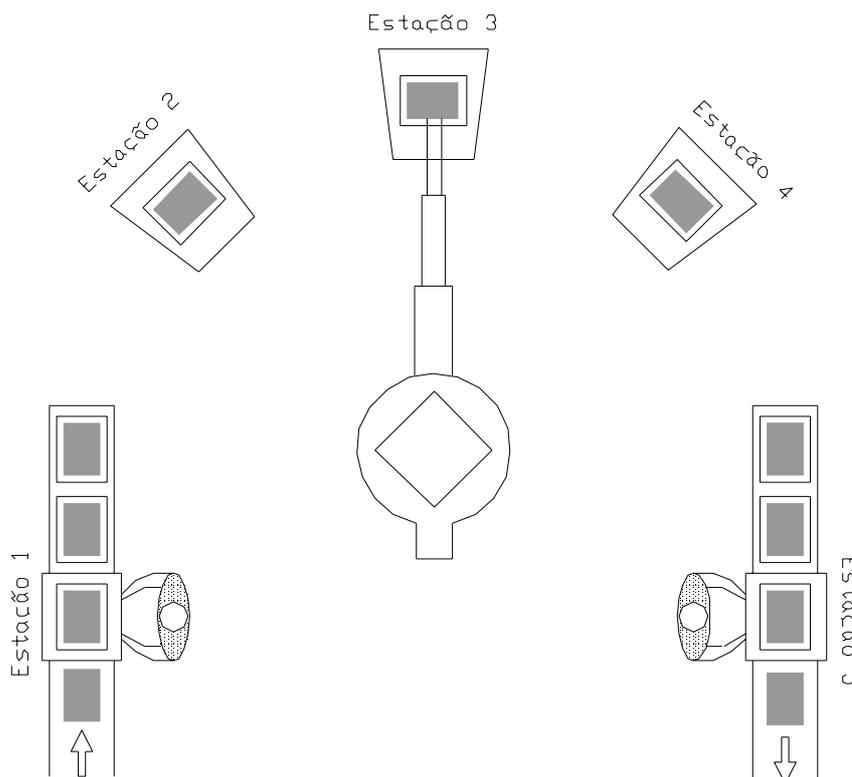


Figura 9.10 - Leiaute conceitual de uma célula de montagem flexível multi-estágio.

9.6 - PROJETO PARA A MONTAGEM

O projeto para montagem (*DFA = Design for Assembly*) compõe o conhecimento técnico-científico baseado na experiência adquirida numa das etapas mais importantes da produção que é a montagem (Bakerjian, 1992). Segundo Sousa (1998), a montagem é atualmente responsável por 25 a 50% do custo e por 40 a 60% do tempo total de produção da maioria dos manufaturados.

O projeto para a montagem pode ser considerado como uma filosofia, um processo e uma ferramenta.

⁵ Células de Manufatura: é uma técnica para produzir diferentes tipos de peças num mesmo grupo de máquinas. O leiaute de células em “U” é usado, para obter os seguintes benefícios:

- Melhor comunicação, identificação e visualização dos problemas;
- Mínima distância entre os equipamentos;
- Corredores para uso comum, menor espaço necessário;
- Sem estoques intermediários;
- Funcionários polivalentes.

Como filosofia o projeto para montagem busca examinar o projeto deste as suas etapas iniciais objetivando a diminuição dos custos do produto, e amenizar a transição entre o projeto do produto até a sua montagem final, melhorando a montagem do produto. O exame do projeto como um todo, não apenas os componentes individualmente, buscando uma montagem eficiente, acaba por trazer melhorias em outros aspectos tais como: a manutenibilidade, a confiabilidade e a qualidade do produto final (Bakerjian, 1992).

Como processo, questiona e analisa a estrutura do produto, o relacionamento entre as partes, o número de partes, os métodos de segurança e o processo de montagem tendo em vista a simplificação ou eliminação da montagem. Promove assim, como questionamentos principais a necessidade de haver componentes físicos separados unifuncionais contra um menor número de partes multifuncionais e, a facilidade de manipulação envolvida. Ou seja, guia a exploração de novas formas de efetuar as tarefas de manufatura ao preparar a equipe de projeto a desafiar as soluções usuais e fazer sugestões a novas abordagens. Isto significa dizer que o *DFA* evolui da aplicação de um método específico para uma mudança na atitude, sendo um processo de aprendizagem e interativo ao mesmo tempo (Bakerjian, 1992).

Como ferramenta, busca a obtenção de informações que permitam avaliar um determinado projeto quanto à montagem, utilizando características tais como: o número total de partes, a dificuldade de manipulação e inserção, e o tempo de montagem. As ferramentas de *DFA* além de propiciarem a comparação entre alternativas de projeto possibilitam, ainda, a aprendizagem sobre benefícios de montagens específicas, auxiliando a equipe a reconhecer partes ou concepções específicas no produto que podem ser melhoradas, apontando o efeito destas na montagem total.

9.6.1 - DFA x DFM

O *DFA* surgiu a partir do conceito de projeto para manufatura e montagem (*DFMA* = *Design for Manufacture and Assembly*) decorrente da necessidade de reprojeter produtos para a automatização da montagem quando a automação da produção era a questão central das empresas em busca da competitividade, e da dificuldade de se transmitir o ponto de vista do chão-de-fábrica para os membros da equipe de projeto (Andreasen, 1988) (Ashley, 1995). Sua importância cresceu e tornou-se uma metodologia complementar ao projeto para manufatura (*DFM* = *Design for Manufacture*). As diferenças básicas que ajudam a compreender melhor a metodologia de projeto para montagem são mostradas a seguir.

No geral, o *DFA* enfoca (Ashley, 1995):

- a consolidação das peças,
- a montagem vertical com o auxílio da gravidade,
- o uso de características de orientação e inserção nas partes,
- a revisão do projeto conceitual através do consenso da equipe de projeto (*promove a engenbaria simultânea*).

Já o *DFM* (Ashley, 1995):

- compara o uso de diferentes combinações de materiais e processos de fabricação selecionados para as partes de uma montagem,
- determina o impacto no custo com o uso destes materiais e processos.

Ou seja, enquanto o *DFM* analisa cada parte em separado e tende a recomendar partes de formas simples em substituição a uma parte de forma geométrica complexa, achando o mais eficiente uso da geometria do componente com relação ao processo de fabricação, geralmente ocasionando um aumento do número de partes. Por outro lado, o *DFA* avalia todo o produto, não somente as partes individualmente, buscando simplificar a estrutura do produto, objetivando o mais eficiente uso da função do componente.

A busca pela redução do número de componentes principalmente os não essenciais, tais como fixadores não integrais (parafusos, rebites, molas, etc.), leva a equipe de projeto a desafiar os limites impostos pelos materiais e processos disponíveis e a buscar novas soluções.

Considerando que no processo de projeto de um produto existe uma intensa relação de função com a forma, os materiais e os processos de produção selecionados, e neste último incluem-se os processos de fabricação e montagem, conforme mostrado na figura 9.11a, a abordagem do DFM enfoca prioritariamente os aspectos da relação entre a forma, o material e processo de fabricação de uma peça, figura 9.11b. Diferentemente, o DFA engloba o relacionamento entre a(s) função(ões) do produto com a forma de suas peças, seus materiais e o processo de montagem, figura 9.10c.

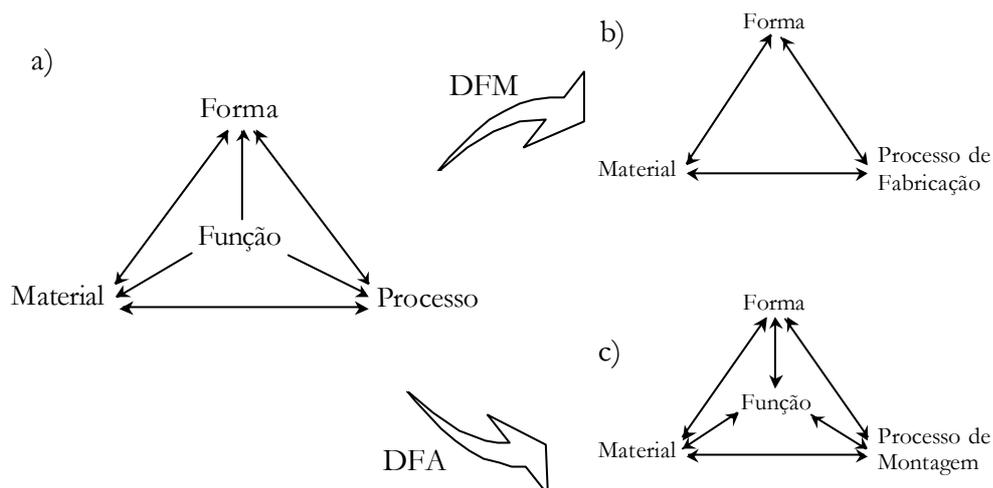


Figura 9.10 - Relacionamentos entre função, forma, material e processo.

Ainda, segundo Bralla (1988), o DFA direciona o projeto para que o produto tenha um menor número de peças, cuja união seja mais eficiente, melhorando a qualidade. Além disso, pode-se obter as seguintes vantagens:

- simplificação dos processos de montagem;
- redução das operações de manipulação;
- possibilidade de maior padronização e modularização dos produtos;
- menor número de passos e ajustes (set-ups) de processamento;
- menor quantidade de pontos/superfícies de encaixe;
- redução de problemas de tolerância (stack-up).

Adicionalmente, conforme Boothroyd (1988), projetos simplificados resultantes do uso das técnicas do DFA muitas vezes levam a uma redução no custo das partes, significativamente maior que no custo de montagem. O projeto de fixações para a montagem também se torna mais simples. Outras vantagens, mais difíceis de quantificar, incluem reduções em trabalho indireto, depreciação de equipamentos, inventários e manutenção de registros; além de aperfeiçoamentos no fluxo de materiais, da produção e na capacidade de espaço (Pahl & Beitz, 1988).

No projeto para montagem, outros aspectos são também considerados, tais como: projeto para a flexibilidade, racionalização funcional, processos de alimentação, aperto e inserção, e suas relações estruturais (Hauser & Clausing, 1988). A equipe de projeto realiza decisões envolvendo:

- a estrutura do produto;
- o número de partes;

- a geometria dos componentes;
- os métodos de união;
- as tolerâncias de montagem;
- composição de superfícies e
- materiais.

A interdependência destes parâmetros também influi na determinação do método e tipo de montagem. As possibilidades de suprir um componente são restritas pela sua geometria. A geometria e as tolerâncias limitam o nível de automação com a qual é possível dentro do custo-meta. A estrutura e projeto das linhas de montagem são enormemente influenciados pela estrutura do produto. As instalações e as ferramentas necessárias são determinadas pelo método de montagem e pela forma das partes (Bralla, 1986).

9.6.2 - PRINCÍPIOS E RECOMENDAÇÕES DO PROJETO PARA A MONTAGEM

A idéia básica no projeto para a montagem é primeiramente reduzir o número de componentes (partes e peças) que devem ser montados, e então assegurar que os componentes remanescentes sejam fáceis de montar e fabricar, reduzindo o custo total da montagem e também satisfazer as especificações funcionais.

Os princípios que norteiam o projeto para a montagem são:

1. Simplificar, integrar e reduzir o número de peças, pois cada peça constitui numa oportunidade para defeitos ou erros de montagem. Poucas peças resultam num menor esforço na manufatura de um produto. Isso inclui itens tais como: tempo de engenharia, número de desenho e de peças; documentos de inventário e controle de produção; número de ordens de compra e venda, número de embalagens, containers, locação de estoques e paletes; quantidade de equipamentos de manipulação de materiais, quantidade de detalhes de contabilidade e cálculos; catálogos e serviços; número de itens de inspeção e tipo de inspeção necessário; e quantidade e complexidade dos equipamentos e facilidades de produção, montagem e treinamento.
2. Padronização e uso de partes comuns e materiais para facilitar as atividades de projeto, minimizar o inventário e padronizar a manipulação e operações de montagem. Partes comuns reduzirem o inventário, os custos e melhoram a confiabilidade. O aprendizado do operador é simplificado e tem-se uma boa oportunidade de automação em função dos grandes volumes de produção e padronização das operações.
3. Projetar produtos e montagem a prova de erros, de modo que o processo de montagem seja não ambíguo. Os componentes devem ser projetados para somente serem montados numa direção. Chanfros, furos assimétricos e batentes podem ser usados para impedir montagens incorretas. Os produtos devem ser projetados para evitar ajustes.
4. Projetar partes que minimizem o esforço e ambigüidade nas orientações e manipulações. As partes devem ser projetadas para terem orientação própria quando alimentadas num processo. O projeto do produto deve evitar partes que se tornem emaranhadas “encunhadas” ou desorientadas. O projeto das partes deve incorporar simetria, baixo centro de gravidade detalhes facilmente identificáveis, superfícies guias e pontos que facilitem a captação e manipulação. Este tipo de projeto pode permitir o uso de automação na manipulação e montagem de partes, através de transportadores vibratórios, tubos, magazines, robôs e sistemas de visão.
5. Minimizar partes flexíveis e interconexões. Evitar partes flexíveis e frágeis tais como correias, gaxetas, tubulações, cabos e armações de arame. A flexibilidade torna difícil a manipulação do material e a montagem, tornando as partes mais susceptíveis a danos.

6. Projetar para a fácil montagem pela utilização de movimentos simples e minimização do número de eixos de montagem. Orientações complexas e movimentos de montagem em várias direções devem ser evitados. Partes devem incluir detalhes tais como chanfros. O projeto do produto deve propiciar que a montagem comece com um componente base, com massa relativamente grande e baixo centro de gravidade, sobre a qual outras partes serão adicionadas. A montagem deverá ser procedida verticalmente com outras partes adicionadas no topo e posicionadas com auxílio da gravidade. Isso minimiza a necessidade de reorientar a montagem e reduz a necessidade de uniões temporárias e fixações complexas. Um produto que é fácil de montar manualmente, geralmente será facilmente montado com automação.
7. Projetar para união e fixação eficientes. Parafusos, porcas e arruelas consomem muito tempo na montagem e são difíceis de automatizar. Onde eles devem ser usados, deve-se utilizar a padronização para minimizar a variedade, e utilizar conectores do tipo engate rápido, snaps e adesivos.
8. Projetar produtos modulares para facilitar a montagem. Um projeto modular deve minimizar o número de partes e as variações de montagens e processos de manufatura, enquanto produz um grande número de variantes do produto durante a montagem final. Este procedimento minimiza o número total de itens a serem manufaturados, conseqüentemente reduzindo os itens de controle e melhorando a qualidade. Módulos podem ser manufaturados e montados em paralelo para reduzir o tempo global de produção do produto, e são mais facilmente testados antes da montagem final.

Como recomendações gerais para o projeto para a montagem tem-se:

- a) O número de peças numa montagem deve ser minimizado. Para isto várias considerações podem ser observadas. A modificação do projeto de modo a que o número mínimo teórico de partes seja tão baixo quanto possível, reconsiderando conceitos alternativos, é uma destas práticas. Achar o número mínimo teórico de componentes requer o exame de cada par de componentes adjacentes no projeto e verificar se existe entre eles movimento relativo, de modo que realmente precisem ser separados; se os componentes devem ser feitos de materiais diferentes; se os componentes necessitam ser separados devido a restrições de fabricação, montagem ou manutenção. Caso não haja movimento relativo, os materiais possam ser o mesmo e não existir outro impedimento, este par de componentes pode teoricamente se tornar um único componente. O uso de partes multifuncionais representa a combinação de partes e/ou funções numa única parte e, geralmente, podem substituir submontagens por completo e, portanto, eliminar várias operações de montagem. Metalurgia do pó, moldagem por injeção de plásticos e pós, chapas metálicas, fundição, e forjamento são exemplos de processos que podem ajudar a alcançar reduções de partes ou partes multifuncionais (ver exemplos nas figuras 9.11 e 9.12).

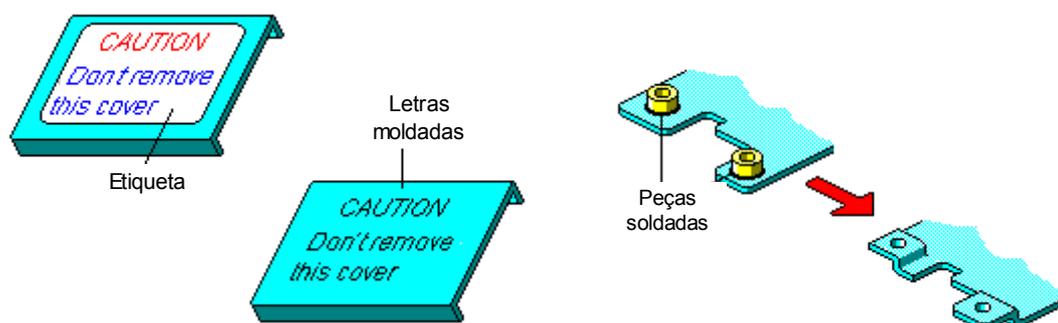


Figura 9.11 - Exemplos da redução de partes.

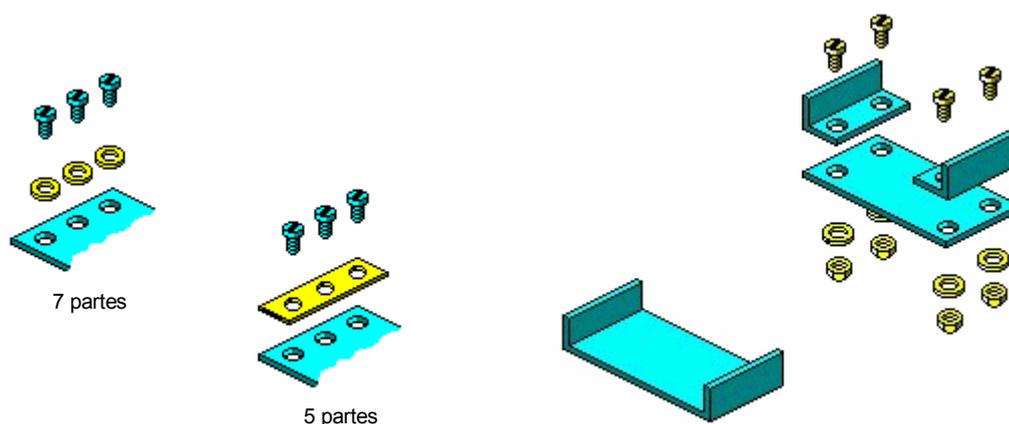


Figura 9.12 - Exemplos da redução de partes.

Um produto com alta eficiência de montagem deve possuir poucos componentes, sendo estes manipulados e conectados facilmente. A eficiência da montagem pode ser observada nos exemplos da montagem de impressoras, mostrada nas figuras 9.13 e 9.14. A figura 9.13 mostra uma vista explodida da impressora Epson MX80, que é composta de 150 diferentes componentes e/ou submontagens, necessitando de 185 operações separadas para a união de todos os componentes. Para isto, são necessários, aproximadamente, 30 minutos para montagem do produto final. Por outro lado, a impressora IBM Proprinter, mostrada na figura 9.14, foi projetada considerando a eficiência de montagem com sendo o principal requisito de projeto. Desta forma, o produto resultante possui somente 32 diferentes componentes e/ou submontagens, necessitando de 32 operações (uma para cada componente) consumindo aproximadamente 3 minutos para a montagem do produto.

Naturalmente, há algumas perdas e ganhos na redução de componentes. Pois, com menor número de partes na montagem, as remanescentes tornar-se-ão mais complexas e caras conforme suas funcionalidades aumentem. Neste momento, o *DFM* contribui com a informação de viabilidade econômica das alternativas de projeto encontradas através da aplicação do *DFA*.

- b) Minimizar o uso de fixadores separados (não integrais). Deve-se ter em mente que cada elemento de fixação é mais um componente a ser armazenado, manipulado e posicionado, que os elementos de fixação não são baratos, e que os elementos de fixação são concentradores de tensões. Outro ponto a ser observado na avaliação de um projeto é quanto à padronização dos elementos de fixação.

Não existem regras para a qualidade de um projeto com relação ao número de elementos de fixação separados. Obviamente, um excelente projeto terá poucos elementos de fixação separados, e os existentes serão padronizados. Projetos pobres, por outro lado, necessitam vários e diferentes elementos de fixação para a sua montagem final. Se mais do que 1/3 dos componentes de um produto são elementos de fixação, a montagem deverá ser questionada. As figs. 9.15 e 9.16 mostram idéias para reduzir o número destes elementos.

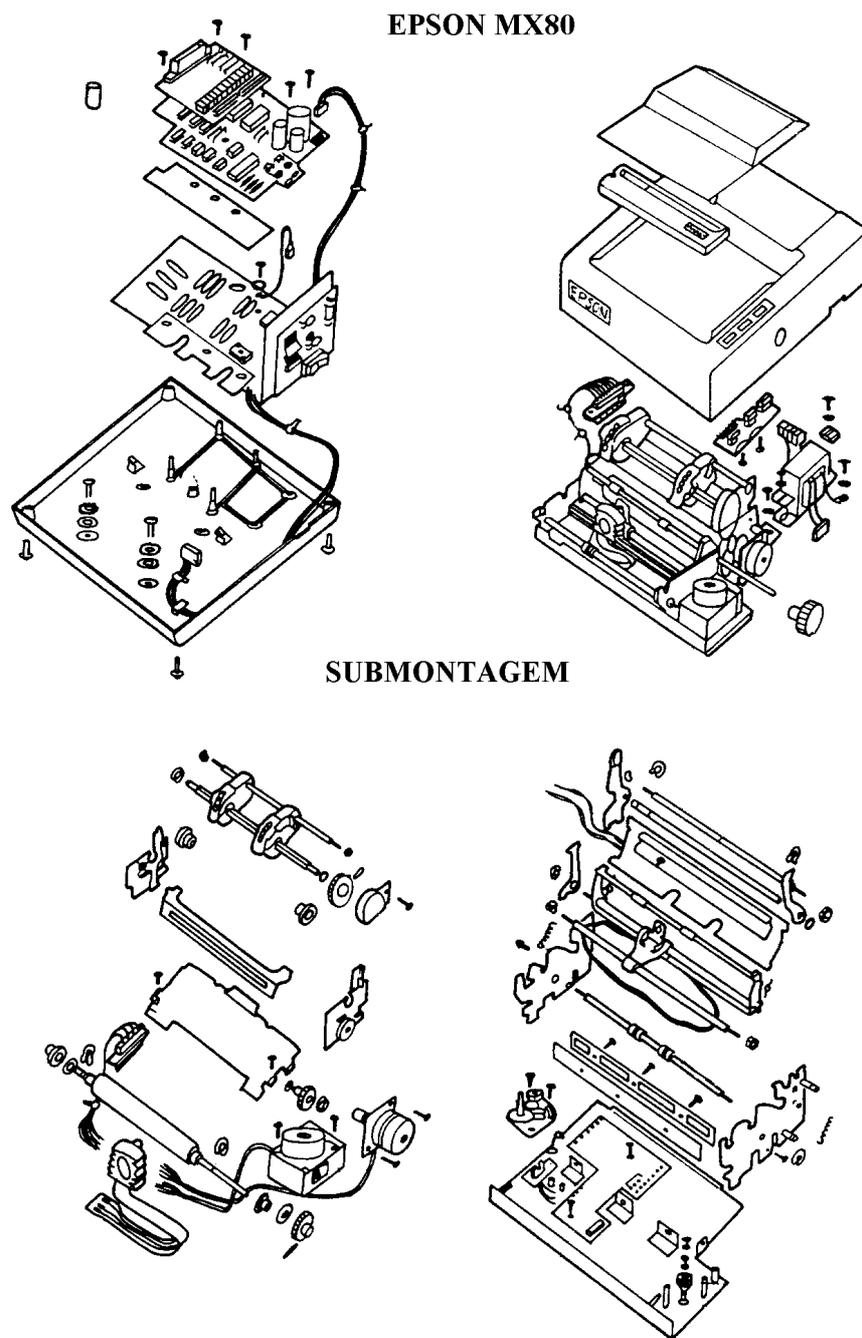


Fig. 9.13 - Vista explodida da impressora Epson MX80 (Ullman, 1992).

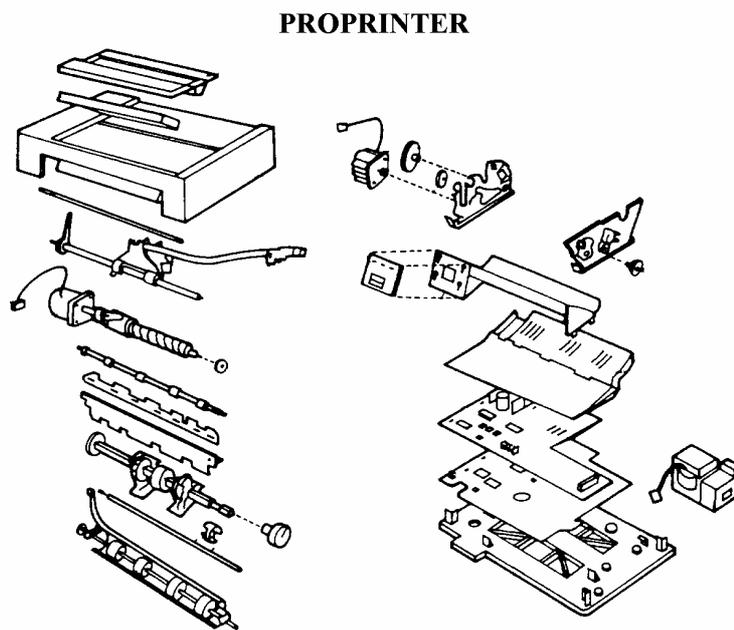


Fig. 9.14 - Vista explodida da impressora IBM Proprinter (Ullman, 1992).

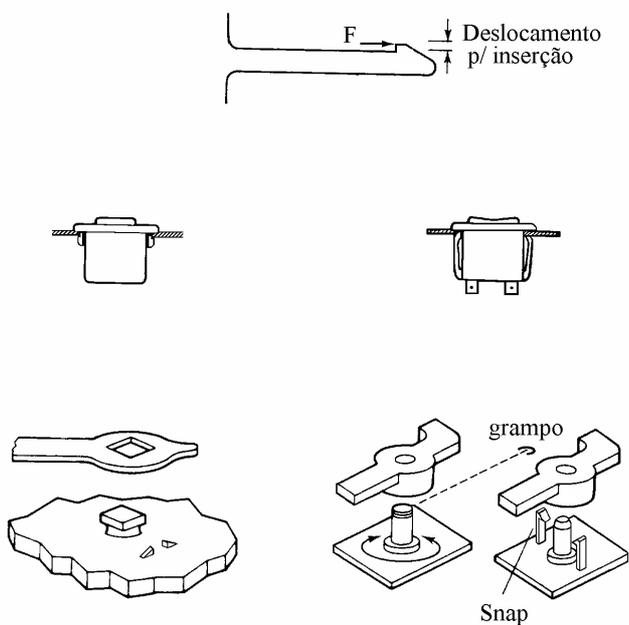


Figura 9.15 - Exemplos do emprego de características auto-fixadoras (Ullman, 1992).

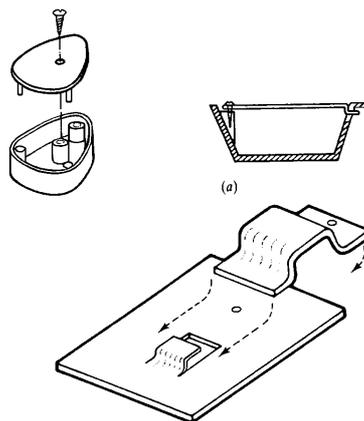


Figura 9.16 - Exemplos do emprego de características auto-fixadoras (Ullman, 1992).

- c) Promover a montagem modular ou componente-base. Deve-se sempre que possível usar uma base simples/única sobre a qual todos os outros componentes serão montados. Sem esta base, a montagem pode consistir em trabalho sobre muitas submontagens, cada uma com suas necessidades de manipulação e composição e a montagem final requerendo extensivo reposicionamento e rearranjo/instalação (Ullman, 1992). Um bom exemplo deste elemento-base é a placa-mãe de um microcomputador.

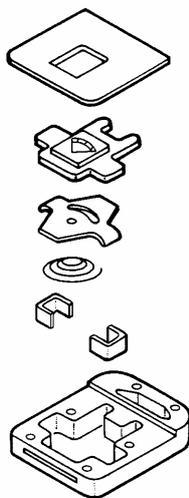


Figura 9.17 - Exemplo de utilização de componente base e montagem empilhada (Ullman, 1992).

Para alcançar-se uma montagem adequada, sugere-se o uso de uma base sólida sobre a qual será realizada a composição do produto, como mostrado na figura 9.17. A base, sendo o componente principal, deve ser adaptada/preparada com superfícies guias ou características de alinhamento que fazem as montagens dos outros componentes e submontagens fáceis de se localizar. Esta base geralmente possui, também, características de fixação, tais como snaps, que manterão as partes unidas assim que colocadas/encaixadas no lugar apropriado.

Considera-se então como montagem modular a que emprega a conexão de módulos ao elemento-base. Módulos são componentes, geralmente padronizados, com características funcionais ou de fabricação, projetados de tal maneira que possam ser aproveitados na construção de diversos produtos; podendo ser ainda, partes estruturadas de um produto, independentes, que se constituem unidades funcionais por si só. São exemplos de módulos independentes os redutores de velocidade e os motores elétricos. A montagem modular é mais

benéfica ainda se for usada numa família de produtos o que implica em padronização na produção.

É sempre vantajoso na montagem mecânica haver uma base sobre a qual a montagem pode ser construída. Este componente base deve ter também, características que o façam adequado para localização confiável no gabarito de trabalho. Um gabarito de trabalho é uma unidade ou montagem separada, independente, com uma série definida de entradas e saídas para monitorar o desempenho do processo. Por exemplo, assegurar sua estabilidade tendo o seu centro de gravidade contido em superfícies planas e horizontais (Boothroyd, 1994). Projetar montagens que contenham estas propriedades pode-se reduzir o tempo total de montagem, simplificar inventários, ordens de serviço, e testes de qualidade.

- d) Padronização de produtos. Deve-se evitar variações desnecessárias na função ou no estilo do produto. Tais mudanças complicam a montagem, elevam a necessidade de treinamento da mão-de-obra e aumentam as tarefas de manufatura. Portanto, encarecem o produto além de dificultarem a otimização do processo fabril.

Se as variações são inevitáveis, então, sempre que possível, deve-se incorporar características para todas as variantes do produto numa submontagem comum. Deste modo, os inconvenientes associados a reprogramação da produção podem ser minimizados pela introdução da variação de produtos no fim do processo de montagem, como ocorre na aplicação da montagem modular.

- e) Padronização dos componentes. A padronização, materiais e componentes (sejam elétricos, eletrônicos ou mecânicos) beneficia a redução de custos do componente e, principalmente, a redução da necessidade de ferramentas especiais.

Deve-se padronizar o uso de componentes sempre que possível especialmente fixadores (parafusos, presilhas, porcas, etc.). Por mais que se tente, fixadores discretos muitas vezes permanecem no projeto. Se for o caso, estes devem ser padronizados e restritos em ordem de preferência de tipos e tamanhos; definidos claramente e disponíveis aos engenheiros projetistas e desenhistas. Por exemplo, minimizar o número de parafusos usados, de tipos de cabeças, formas de corpo, diâmetros e comprimentos diferentes. Ou então, um tipo simples de fecho usado por todo o produto para eliminar qualquer variedade em ferramentas e torques necessários para montar o produto. Por fim, deve-se sempre examinar todas as peças para determinar a “essencialidade” da mesma a fim de atender à função requerida para o todo.

De um modo, o uso de partes padronizadas vai contra a tentativa de minimizar a quantidade de partes. As vantagens e desvantagens de cada abordagem devem ser avaliadas. Às vezes, usar uma parte padrão disponível através de uma família de produtos é melhor que introduzir soluções mais complexas para cada produto em particular na família. A economia em escala será um fator favorável. Há relatos que a padronização limita a liberdade criativa da equipe de projeto. Como tudo na engenharia, o bom-senso deve prevalecer. Padrões e normas são para serem seguidos e também questionados.

- f) Montagem empilhada ou unidirecional. Sempre que possível, deve-se projetar o produto para um mínimo de direções de inserção. Isto reduz a necessidade de reorientar um produto durante a montagem. A reorientação da peça de trabalho, ou do operário, é requerida sempre que há múltiplas superfícies de processamento numa montagem. A montagem empilhada e unidirecional, preferencialmente vertical de cima para baixo, como exemplificado na figura 9.17, facilita o trabalho de montagem.

A equipe de projeto deve conscientizar-se da importância da geometria das partes na montagem. Quando as partes precisam ser rotacionadas, parcialmente montadas, ou sustentadas em determinada posição durante a operação de montagem, isto tudo é perda de tempo.

Adicionalmente, tente projetar partes que sejam orientadas rapidamente abusando das vantagens de fazer partes totalmente simétricas. Se a simetria total não for possível, então, projetar para uma assimetria óbvia a fim de evitar confusões. Marcas de alinhamento de modo a ter-se um alto grau de contraste visual é uma boa prática.

A montagem do projeto ideal deve ser similar a um bolo de camadas, com cada componente ou submontagem fixa no todo do outro, cuja montagem deve ser a prova de falhas através de peças que não se encaixarão quando orientadas incorretamente.

A figura 9.18 apresenta um exemplo da redução de movimentos pelo emprego de snaps em toda a base para facilitar a montagem unidirecional.

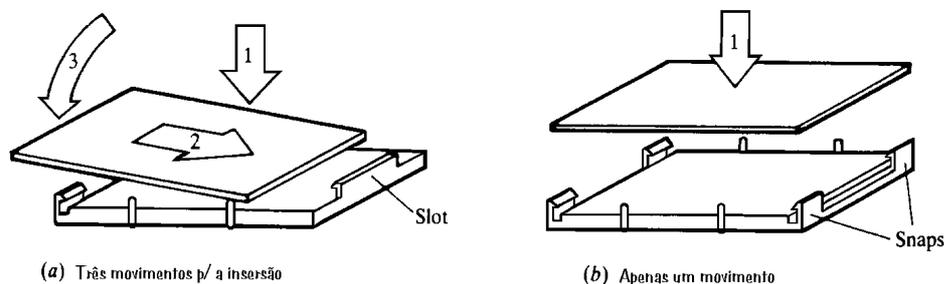


Figura 9.18 - Exemplo do emprego da montagem unidirecional (Ullman, 1992).

- g) Projetar partes com características de autolocalização. Quando uma pessoa é instruída a inserir um eixo num mancal, ela tem a habilidade de sentir pelo tato e posicionar o eixo no mancal corretamente. Já uma máquina simples com a mesma missão, falha na habilidade de ajustar a localização das partes pelo tato, necessita assim, de ter as partes precisamente localizadas e orientadas. Da mesma forma que operações mecanizadas, operações de montagem necessitam de localizações precisas e superfícies adequadas para o encaixe. O conhecimento destas condições conduz o projetista a criar compensações no projeto que eliminem grandes forças e pequenas tolerâncias (Ullman, 1992).

Características de autolocalização em peças possibilitam a montagem e as partes subseqüentes de serem colocadas numa posição precisa sem ajustamento. Isto reduz o treinamento de operários, simplifica o processo de montagem e assegura que o desempenho do produto não será prejudicado. Ou seja, influencia positivamente a qualidade da montagem como também o tempo de montagem.

Além de providenciar chanfros e outras características de localização, alargar folgas/tolerâncias onde for possível facilita a inserção (ver exemplos na figura 9.19). Às vezes, características de localização como chanfros, “dimples” e “tab-in-slot”, podem ser providenciados sem nenhum custo adicional ao custo total do componente (Boothroyd, Dewurst & Knight, 1994).

Projetar um produto de forma que montagens de partes ou módulos subseqüentes são localizadas nas partes previamente montadas, ou construindo unidirecionalmente, possibilita a montagem automática, reduz reorientações da peça de trabalho, e melhora qualidade, porque se torna mais difícil que se salte (esqueça) operações. Promove ainda, montagens semipermanentes, simplifica a orientação e ajuda prevenir a necessidade de ajustes pós-montagem. Quando do uso de módulos, principalmente os montados por empilhamento, é aconselhável que submontagens sejam facilmente localizadas para a compatibilidade com as operações do cliente se requerido.

- h) Agrupamento de submontagens/ níveis de montagem. Onde for possível, os componentes devem ser agrupados em submontagens. Isto melhora flexibilidade na programação/planejamento do processo da montagem. Conseqüentemente, seqüências de montagens podem ser planejadas ou eliminadas para minimizar a perda de tempo na mudança de ferramental. Componentes que são localizados numa submontagem devem ser fixados antes da submontagem ser completada.

Reduzindo os níveis de montagem, ou o número de submontagens e suboperações num processo, simplifica-se especificações e documentação, facilita-se o processo de montagem, e o leiaute da fábrica. A montagem de módulos ou partes sem ajustes reduz a montagem final e

os procedimentos de testes, reduz ainda a manipulação, ferramentas e instalações, e melhora a qualidade. Para evitar ajustes, uma análise estatística da tolerância do produto é necessária, então, as tolerâncias devem ser apertadas somente onde for necessário. Neste caso, deve-se considerar a distribuição de tolerâncias no produto, e as probabilidades que as peças de tolerâncias finais irão aparecer juntas numa simples montagem.

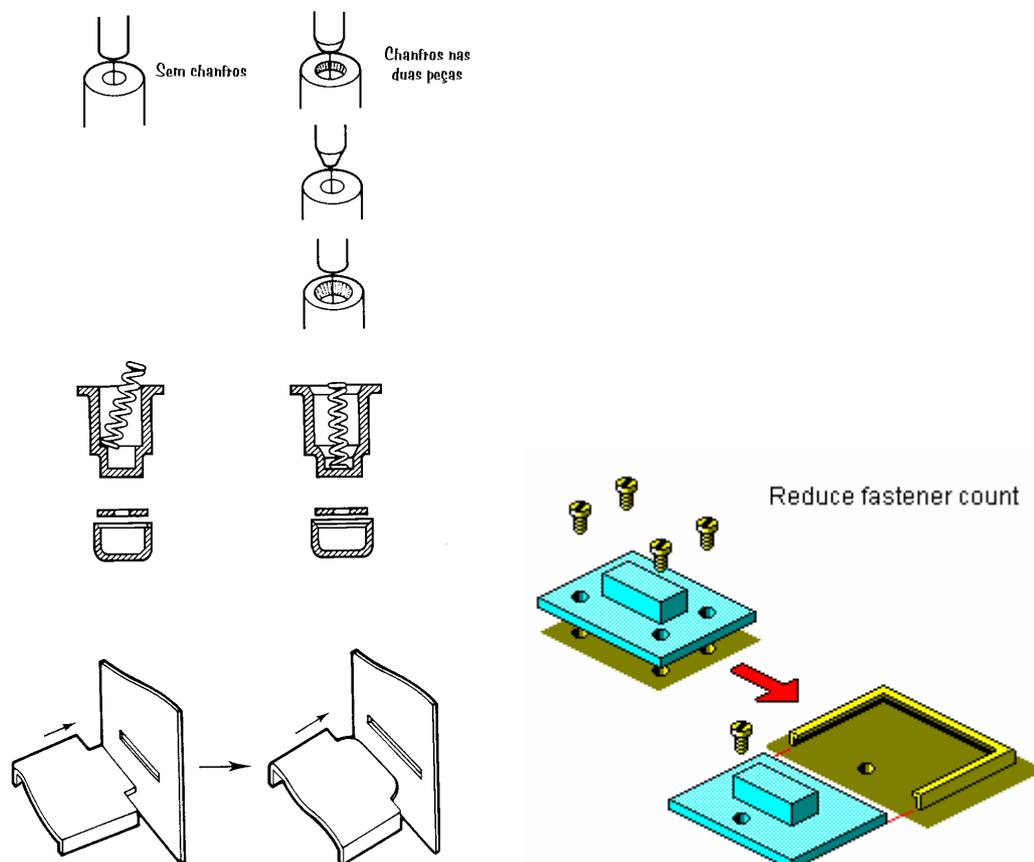


Figura 9.19 - Exemplos do emprego de características de autolocalização (Ullman, 1992).

i) Facilitar a manipulação de peças. Projetar partes fáceis de se pegarem, possibilita a rápida manipulação, e, portanto, reduz os tempos de montagem. Os principais fatores que afetam a manipulação são:

- geometria: pode ser simplificada pelo emprego de formas regulares;
- rigidez: evitar materiais macios/moles ou frágeis;
- peso: evitar componentes pesados.

A minimização do peso do produto ajuda a reduzir os tempos de manipulação e inserção do componente. A massa de uma peça não deve ser maior que a necessária para atender a função, resistência ou rigidez requerida para ela. Deve-se assegurar que cada parte possa suportar as forças presentes na usinagem, montagem e em serviço.

Outras características que afetam a manipulação de peças, e que podem ser modificadas para melhorar a montagem do produto são:

- peças simétricas para reduzir a orientação das mesmas (fig. 9.20);
- se a simetria não for possível, projetar características obviamente assimétricas (fig. 9.20);
- não utilizar partes que se aninham ou se emaranham (fig. 9.21);
- considerar o empacotamento individual das peças e a presença do operador;
- usar furos ovais para evitar ajustes;
- usar as propriedades elásticas do plástico com uma vantagem;

- facilitar o acesso ao componente, maximizando o espaço disponível;
- evitar partes que necessitem serem manipuladas por duas mãos ou mais de um operário.

Como já dito, a equipe de projeto deve sempre questionar sobre a forma como cada componente pode ser “alimentado”. Isto nada mais é do que pensar na infra-estrutura da produção. Um simples pensamento que pode auxiliar em muito a simplificação do produto e do processo produtivo.

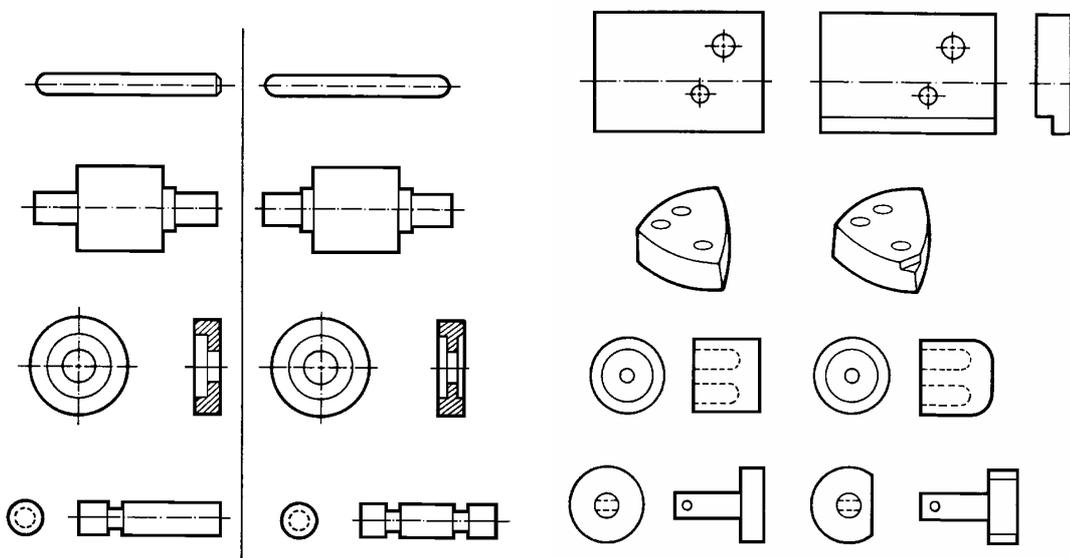


Figura 9.20 - Exemplos de reprojeto para evidenciar a simetria ou assimetria das partes (Ullman, 1992).

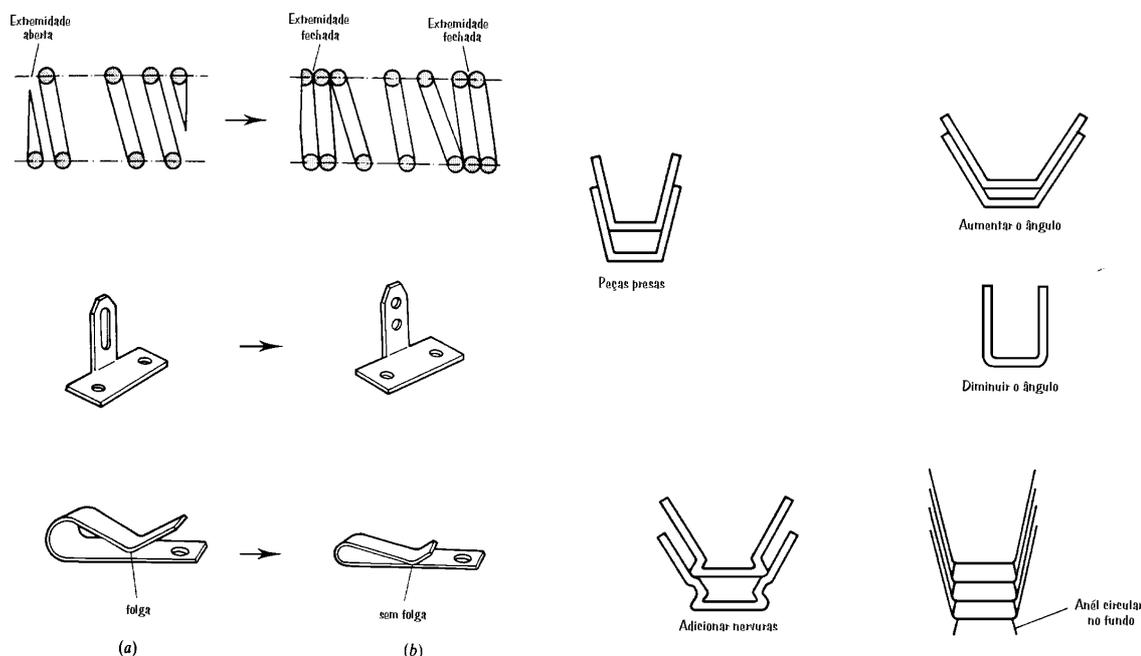


Figura 9.21 - Exemplos de reprojeto para evitar o emaranhamento das partes (Ullman, 1992).

- j) Projetar partes para que tenham estabilidade durante a montagem. Isto assegura que tempo não seja perdido em equilibrar submontagens que caem ou rolam. Providenciar características que permitam as partes de repousarem firmemente na correta orientação para montagem. Buscar o uso de superfícies que já sejam necessárias para a função do componente. Ou seja, as partes devem ser ou auto-fixantes ou permanecerem estáveis numa posição.
- k) Otimizar a seqüência de montagem. A seqüência de montagem pode ser determinada pela lógica, mas a correta compreensão das interfaces de cada peça facilita, não só encontrar a melhor seqüência como também melhora a percepção de componentes com potencial de serem unidos. Por isso, uma técnica bastante útil é o uso do Diagrama de Interfaces. A seqüência da montagem tem grande influência na desmontagem e na manutenibilidade do produto, como também no leiaute tanto da fábrica quanto da linha de montagem. Segundo Ullman (1992), uma seqüência eficiente é aquela que:
- possui o menor número de passos,
 - evita o risco de danificar as partes,
 - evita posições instáveis ou inseguras para o produto, operários ou equipamentos durante a montagem.

9.7 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA MONTABILIDADE

Parte dos custos de manufatura de um produto é representada pelo custo para montá-lo, e em alguns produtos é uma parte significativa dos gastos com mão-de-obra.

A avaliação da montagem é uma técnica usada para medir a facilidade com a qual o produto pode ser montado. Como praticamente todos os produtos são configurados pela união de vários componentes, através da montagem, e este processo consome tempo, e tempo significa custo, existe uma grande motivação para o desenvolvimento de produtos que possam ser montados o mais facilmente possível. Portanto, a facilidade de montagem de um produto é diretamente proporcional ao número de componentes que devem ser unidos e a facilidade de transporta-los, manipula-los e posiciona-los.

Desde o final dos anos 70, vários métodos foram desenvolvidos para medir a eficiência da montabilidade de um projeto. Todos estes métodos requerem que o projeto do produto esteja satisfatoriamente detalhado, para que possam ser aplicados. Alguns destes métodos são apresentados abaixo:

9.7.1 - MÉTODO DE BOOTHROYD & DEWHRUST

Este método é apresentado como um procedimento de análise estruturada do projeto, com o objetivo de guiar a equipe de projeto a um produto estruturado de maneira robusta e elegante (Boothroyd & Altling, 1992). Pode ser utilizado para a montagem manual, automatizada e robotizada. Atualmente, este método é aplicado segundo as seguintes diretrizes:

- a) Através de três critérios básicos, a existência de cada componente individual é questionada, tendo assim o projetista que, justificar porque o componente não pode ser eliminado ou combinado com outros. Os componentes que atendem os critérios de existência são totalizados e fornecem o número mínimo teórico de componentes. A peça é subtraída do conjunto se houver resposta negativa às seguintes questões:
- O componente deve possuir movimento relativo ao conjunto?
 - O material do componente deve ser diferente do material do conjunto?
 - O componente deve ser separado para permitir a desmontagem e remontagem do conjunto?

- b) O tempo de montagem é estimado, utilizando-se um banco de dados de tempos padrões reais desenvolvidos especialmente para esta finalidade (Boothroyd, 1979).
- c) Um índice de eficiência do projeto é obtido pela comparação do tempo de montagem atual do produto com o tempo teórico mínimo de montagem;
- d) Dificuldades de montagem, que podem levar a problemas de qualidade e produção, são identificadas.

9.7.2 - MÉTODO DE LUCAS

Este método foi elaborado para ser utilizado para o trabalho de equipe dentro de ambientes de engenharia simultânea. É fundamentalmente voltado para a montagem automática e robotizada, mas também pode ser utilizado para a montagem manual. É composto basicamente dos seguintes passos:

- a) Análise Funcional, na qual os componentes são categorizados naqueles definidos pelas especificações de projeto, e nos componentes necessários numa solução particular de projeto. A eficiência do projeto é obtida como uma porcentagem entre as duas categorias;
- b) Análise da alimentação e manipulação, na qual os componentes são pontuados segundo três diferentes aspectos: tamanho e peso; e dificuldades de manipulação e orientação das peças. A razão manipulação/alimentação é calculada e o resultado é dividido pelo número de peças;
- c) Análise de encaixamento, baseada na seqüência de montagem, onde cada componente é avaliado quanto a necessidade de alinhamento, direcionamento, força de inserção e restrição de visão.

9.7.3 - MÉTODO AEM DA HITACHI

Este método, também conhecido como Assembly Evaluation Method, desenvolvido pela Hitachi, utiliza dois índices que devem ser empregados nos estágios iniciais do processo de projeto, denominados de score avaliação da montagem e razão de custos de montagem. O primeiro é usado para medir a qualidade do projeto, tomando como base a dificuldade de montagem, e o segundo é usado para estimar os custos de montagem do projeto, tomando como base custos de montagem conhecidos e utilizados em outros produtos. Este método não faz distinção entre montagem manual, automática e robotizada. Atualmente existe uma nova versão do método, que considera a influência da precisão dimensional, do tamanho e peso dos componentes, a repetição das operações, etc., sobre o custo de montagem. Novos recursos, também foram adicionados visando reduzir a influência da subjetividade dos usuários nas avaliações.

9.7.4 - MÉTODO DAC DA SONI

Este método, também conhecido como Design for Assembly Costs, desenvolvido pela Soni, classifica os fatores para avaliação em 30 palavras-chave. As avaliações são exibidas num diagrama de barras, no qual cada operação envolvida na montagem do produto é pontuada. A lista de operações permite a identificação rápida das operações que possuem baixa pontuação. A ênfase é dada para a facilidade com que cada operação pode ser realizada automaticamente.

9.7.5 PLANILHAS

Além dos métodos anteriores, há ainda, as planilhas propostas por Poli, Graves & Gropetti (1986), Poli & Fenoglio (1987), e por Ullman (1992). Destas, não se entrará em detalhes nas duas primeiras por estas já terem sido descritas e exemplificadas em Oliveira (1990), e serem de uso exclusivo na fase de protótipo do projeto detalhado por requererem a montagem ou desmontagem do produto final para serem preenchidas.

9.7.5.1 - Planilha para análise da montagem e balanceamento da linha de montagem

Desenvolvida por Poli, Graves & Gropetti (1986), esta planilha destina-se exclusivamente à montagem manual e a avaliar o produto em relação à fácil montagem e manipulação de peças. Utilizando um código de cores, o mesmo banco de dados de tempo do método Boothroyd-Dewhurst e um gráfico para estimar custos, o produto, ou um protótipo deste, deve ser montado ou desmontado para o preenchimento da planilha, sendo preferível a análise através da desmontagem. O objetivo é determinar e localizar os problemas de montagem existentes como tarefas difíceis de serem realizadas e partes que afetam a manipulação do produto.

9.7.5.2 - Planilha para a montagem automática

Proposta por Poli e Fenoglio (1987), foi desenvolvida para analisar a montagem automática de um produto. Muito parecida com a planilha anterior, utilizando código de cores, banco de dados e gráficos de custos que levam em consideração as peculiaridades do processo automático, o método de preenchimento é similar ao da montagem manual.

9.7.5.3 - Planilha proposta por Ullman

Ullman (1992), propõe um índice de medição do potencial de melhoria da montabilidade do produto parecido com o índice de Boothroyd-Dewhurst, com a vantagem de não ter que calcular tempos de montagem, e sim, somente o número de componentes. O potencial de melhoria PM_{Ullman} é conhecido encontrando-se a razão entre o número atual de componentes N_{atual} subtraído do mínimo número teórico de partes N_{tmin} pelo mesmo número atual de componentes, como apresentado na equação 9.4.

$$PM_{Ullman} = \frac{N_{atual} - N_{tmin}}{N_{atual}} \quad (9.4)$$

Recomenda-se o reprojeito para potenciais superiores a 40%. Há ainda, uma planilha, mostrada na figura 9.22, a ser preenchida para cada parte considerando os aspectos da montagem no geral, a manipulação, o encaixe e a aquisição dos componentes.

A planilha de trabalho foi desenvolvida para dar a pontuação da eficiência de montagem de cada produto analisado. A pontuação varia de 0 a 104. Quanto maior a nota, melhor a montagem. O valor obtido é usado como uma mensuração relativa para comparar projetos/concepções alternativas do mesmo produto ou de produtos similares. O valor absoluto da pontuação não tem qualquer significado. Entretanto, analisando a planilha, um projeto muito bom estará acima dos 78 pontos, enquanto um abaixo dos 52 pontos será recomendável ao reprojeito. O projeto/concepção pode ser modificado baseando-se nas sugestões proporcionadas pelos princípios e então reavaliado. A diferença entre a pontuação do produto original e o reprojeito propicia uma indicação da melhoria da eficiência de montagem.

O autor concorda que esta técnica só pode ser aplicada no projeto preliminar/detalhado, quando o produto está refinado o suficiente, que os componentes individuais e os métodos de união estão determinados. No entanto, a sua contribuição pode ser apreciada bem mais cedo. Tal é verdade, depois de desempenhar a avaliação preenchendo-se a planilha várias vezes, o projetista

desenvolve um senso do que torna/faz um produto fácil de montar, um conhecimento que terá efeito em todos os projetos futuros.

Continuando, o autor defende que o uso do DFA como indicador da qualidade de projeto só faz sentido para produtos de produção em massa, por encorajar componentes complexos cujo valor empregado nas modificações podem ser maior que os benefícios.

AVALIAÇÃO DA MONTABILIDADE		Avaliado por _____			Data: __/__/__	
		Revisado por _____			Data: __/__/__	
Análise de montagem individual para _____				Avaliação n.º: 01 02 03 04 05		
Montagem Global					Comentários	
1) Conta total de partes minimizadas (potencial de melhoria)	<input type="radio"/> pobre (>60%)	<input type="radio"/> razoável (40-60%)	<input type="radio"/> boa (20 -40%)	<input type="radio"/> muito boa (11-20%)	<input type="radio"/> excelente (<10%)	
2) Mínimo uso de fixadores separados	<input type="radio"/> pobre	<input type="radio"/> razoável	<input type="radio"/> bom	<input type="radio"/> muito bom	<input type="radio"/> excelente	
3) Parte básica com características de instalação	<input type="radio"/> pobre	<input type="radio"/> razoável	<input type="radio"/> boa	<input type="radio"/> muito boa	<input type="radio"/> excelente	
4) Reposicionamento requerido durante a montagem	<input type="radio"/> dois ou mais		<input type="radio"/> um		<input type="radio"/> sem repos.	
5) Eficiência da seqüência de montagem	<input type="radio"/> pobre	<input type="radio"/> razoável	<input type="radio"/> boa	<input type="radio"/> muito boa	<input type="radio"/> excelente	
Resgate das Partes						
6) Características que complicam a manipulação (flexibilidade excessiva, emaranhamento, etc.) foram evitadas	<input type="radio"/> nenhuma parte	<input type="radio"/> poucas partes	<input type="radio"/> algumas partes	<input type="radio"/> a maioria das partes	<input type="radio"/> todas as partes	
7) As partes foram projetadas para uma abordagem específica de alimentação (volume, linha, carregador)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Manipulação das partes						
8) Partes simétricas de ponta a ponta	<input type="radio"/> nenhuma parte	<input type="radio"/> poucas partes	<input type="radio"/> algumas partes	<input type="radio"/> a maioria das partes	<input type="radio"/> todas as partes	
9) Partes simétricas ao eixo de inserção	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
10) Onde a simetria é impossível, as partes são claramente assimétricas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
Combinação das Partes						
11) Movimentações retilíneas de montagem	<input type="radio"/> nenhuma parte	<input type="radio"/> poucas partes	<input type="radio"/> algumas partes	<input type="radio"/> a maioria das partes	<input type="radio"/> todas as partes	
12) Chanfros e características que facilitam a inserção e o auto-alinhamento	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
13) Máxima acessibilidade às partes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
<p>NOTA: pontuação de avaliação a ser usada somente para comparar uma montagem a alternativas de projeto da mesma montagem.</p> <p style="text-align: right;"> <input type="radio"/> total x 8 <input type="radio"/> total x 6 <input type="radio"/> total x 4 <input type="radio"/> total x 2 <input type="radio"/> total x 0 </p> <p style="text-align: right;">total =</p>						

Figura 9.22- Planilha proposta por Ullman (1992).

Apesar de sua reconhecida importância, a planilha apresenta-se muito subjetiva quanto ao seu preenchimento, requerendo-se um razoável conhecimento da equipe de projeto sobre a

mesma. Uma desvantagem do índice do potencial de melhoria é para os casos de projetos compostos por um número de partes pequeno, quando o potencial mostra-se ainda relativamente alto, mas esconde qual será o esforço necessário para melhorar o projeto.

9.8 - A SEQUÊNCIA DE MONTAGEM

Para realizar o planejamento da seqüência de montagem é imperativo o conhecimento da estrutura do produto e do sistema de montagem a ser empregado. Na prática, existem três situações distintas a partir das quais o planejamento da seqüência de montagem é realizado:

- 1) A primeira delas é onde não se tem o produto nem o sistema de montagem. Neste caso, pode-se realizar o desenvolvimento conjunto do produto e do processo de montagem já na etapa de projeto conceitual. Em função desta integração, os melhores resultados são geralmente obtidos a partir desta situação;
- 2) A segunda é onde existe o produto ou o sistema de montagem. Este caso não possibilita tantas soluções quanto o primeiro, mas através de modificações no produto, no processo ou em ambos; bons resultados são alcançados;
- 3) A terceira situação é quando o produto e o sistema de montagem já existem. Nesta condição, o número de soluções possíveis é menor, e normalmente os resultados não são expressivos como os anteriores. Estas observações não são verdadeiras para o caso onde o sistema de montagem já foi projetado, prevendo-se a entrada de um novo produto.

9.8.1 - ESTRUTURA DO PRODUTO

Conforme Baartman (1995), a estrutura de um produto pode ser definida como uma descrição das peças de um produto e as relações entre as mesmas.

A estrutura do produto é determinada pela equipe de projeto, tendo em mente os aspectos funcionais, o custo, a fabricação das peças e o processo de montagem. Outros aspectos como a manutenibilidade e a confiabilidade também são levados em conta no momento da definição da estrutura do produto. Apenas recentemente as vantagens de se otimizar a estrutura do produto tornaram-se claras. Por exemplo, se as peças de um produto puderem ser agrupadas em módulos que sejam padrões, e os mesmos forem montados em um estágio final do processo de manufatura, elas podem ser manufaturadas mais eficientemente (até testadas separadamente). Com isso pode-se obter vantagens como a diminuição do custo final de fabricação e do tempo entre o pedido e a entrega.

Um produto mecânico constitui-se, geralmente, da montagem de muitas peças manufaturadas ou compradas. Podem existir ainda submontagens ou módulos, que por sua vez são constituídos de uma série de peças. Desta forma um produto é a montagem final de peças, submontagens ou módulos. A figura 9.23 ilustra uma estrutura de produto hierárquica.

Para descrever totalmente um produto, são necessários dados a respeito dos itens (peças, submontagens ou módulos e matéria-prima) e dados da estrutura do produto. Isto pode ser realizado através de diagramas como os da figura 9.24 (Hitomi, 1979). As ditas “listas de material”, apesar de descreverem apenas os itens e a sua quantidade, são de muita utilidade no “chão-de-fábrica”, principalmente para a conferência e suprimento de materiais.

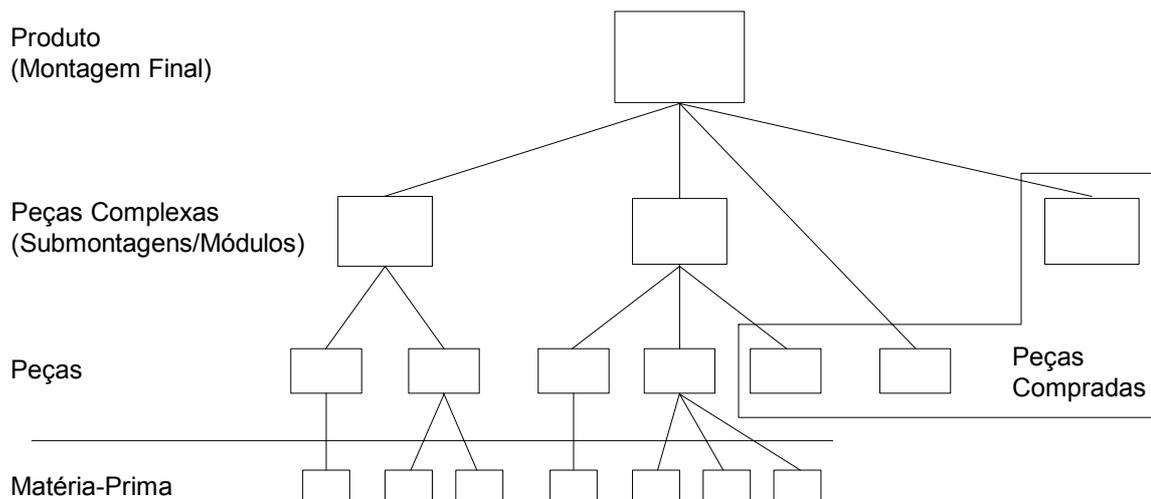


Figura 9.23 - Ilustração de uma estrutura de produto hierárquica (Hitomi, 1979).

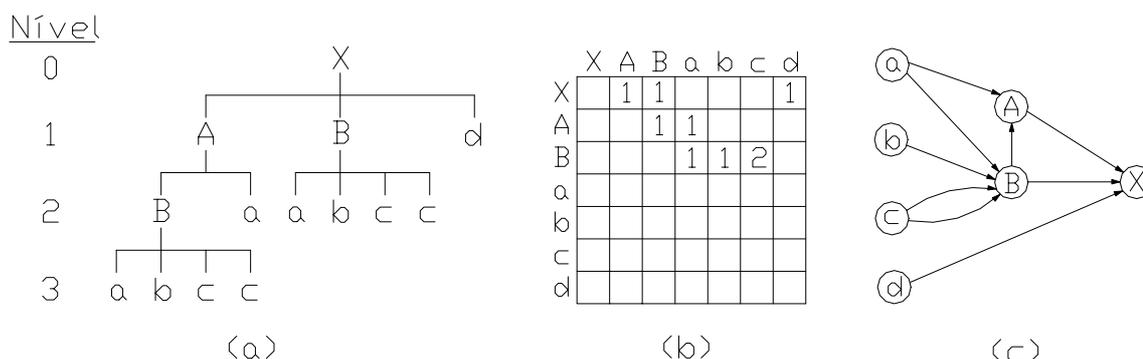


Figura 9.24 - Representação da estrutura do produto ou da lista de materiais através de diagramas (a) Árvore (b) Matriz de incidência (c) Gráfico (Hitomi, 1979).

Depois de realizado o planejamento da produção, as quantidades e tipos de peças e submontagens ou módulos requeridos devem ser determinados. Isto é realizado pela explosão do produto em diferentes níveis (figura 9.24 (a)). A cada explosão as peças que compõem o produto são detalhadas; desde sua forma final, passando pelas submontagens ou módulos e peças, até a matéria-prima (quando não se tratarem de peças compradas). Através de sucessivas explosões obtém-se a lista de materiais.

A quantidade de peças ou matéria-prima necessária durante um período de produção predeterminado, é obtida através da multiplicação da quantidade final de produtos requerida, pela quantidade de peças ou materiais indicada na lista de materiais dos produtos agendados.

9.8.2 - O PLANEJAMENTO DA SEQÜÊNCIA DE MONTAGEM - PSM

A escolha da seqüência de montagem e a identificação de submontagens estão tão relacionadas com os aspectos de projeto do produto, que naturalmente promovem a integração com a manufatura durante a fase de projeto detalhado.

O estudo das seqüências de montagem envolve a identificação das potenciais superfícies de fixação, manuseio e forças de montagem, ajustes e tolerâncias, além de outros aspectos que devem ser considerados no projeto das peças. É importante ressaltar que a consideração destes aspectos é mais importante no caso da montagem automatizada.

Imagine um produto hipotético constituído de dez peças. Teoricamente este produto pode ser montado através de “N!” seqüências de montagem diferentes, dentre elas, de cima para baixo, de baixo para cima, ou a partir de submontagens. Uma pergunta que pode surgir é:

“O que torna uma seqüência ou maneira de montar melhor do que a outra?”

Abaixo, encontram-se listados alguns pontos que podem responder a pergunta formulada:

- *Razões construtivas*, como o acesso aos pontos de conexão, os quais podem reduzir o tempo total de montagem e a quantidade de recursos necessários;
- *Facilidade de realizar a montagem*, pois algumas seqüências podem gerar montagens de sucesso duvidoso ou cuja falha pode resultar em dano a outras peças, causar condições de montagem inseguras, prejudicar o funcionamento do produto, ou colocar em risco o usuário final;
- *Razões de controle de qualidade*, como a possibilidade de testar a função de uma submontagem ou o cancelamento de seqüências que inserem peças frágeis já no início do processo de montagem;
- *Razões de processo*, pois algumas seqüências podem não permitir que uma peça seja fixada ou direcionada através da superfície desejada, comprometendo o sucesso da montagem. Algumas seqüências podem necessitar muitos movimentos improdutivos, como fixações ou troca de ferramentas. Em algumas seqüências pode ser necessário virar a montagem, possibilitando a desmontagem espontânea, caso não tenham sido previstos meios de fixação adicionais. Virar a montagem pode até não ser um problema na montagem manual, mas quando se tratar de uma montagem automatizada, esta operação pode ser difícil, incômoda e cara;
- *Tipo de montagem a ser empregado*, já que a seqüência ótima para uma montagem manual, dificilmente será uma boa opção para uma montagem mecanizada ou automatizada. Outro ponto a ser considerado neste item é a força requerida e o número de graus de liberdade necessários para a realização da montagem;
- *Balanceamento da linha de montagem*, geralmente é o ponto que mais influencia na escolha da seqüência de montagem. As atividades são agrupadas e relacionadas a estações de trabalho, de maneira que a taxa de utilização das mesmas seja a maior possível;
- *Razões estratégicas de produção*, como no caso de submontagens ou módulos comuns a diversos modelos produtos;
- Além das acima citadas, ainda existe uma série de outras considerações que podem, e sempre que possível devem ser consideradas, para auxiliar na determinação da melhor seqüência de montagem.

9.8.2.1 - REPRESENTAÇÃO DAS SEQÜÊNCIAS DE MONTAGEM

Um artifício muito utilizado durante a realização do PSM, é a representação gráfica das seqüências de montagem. Ela permite um melhor entendimento do processo e facilita a análise e comparação das seqüências geradas.

Existem diversas formas de se representar graficamente uma seqüência de montagem, sendo que as mais conhecidas são: diagramas de precedência, diagramas de ligação, gráficos “e/ou” e redes de Petri. O emprego de uma ou da combinação delas depende da complexidade do produto, experiência do especialista e das ferramentas disponíveis, uma vez que muitas delas servem de entrada para métodos computacionais de análise da montabilidade.

REPRESENTAÇÃO POR DIAGRAMAS DE PRECEDÊNCIA

Um diagrama de precedência é um gráfico que representa a(s) maneira(s) através da(s) qual(is) um produto pode ser montado. Nele, devem estar incluídas todas as restrições à montagem do produto. Ele é, basicamente, construído a partir de uma análise conjunta da estrutura do produto, forma geométrica e tamanho das peças, com os recursos disponíveis para realização da montagem. Outra abordagem usada na construção de um diagrama de precedência é o estudo de todas as seqüências de desmontagem possíveis para o produto. Esta última forma é mais utilizada quando o produto ou um protótipo do produto já se encontra disponível.

Não existe uma padronização quanto à simbologia empregada em diagramas de precedência. Geralmente utilizam-se círculos com números inscritos para representar os elementos de trabalho ou operações que constituem a montagem. Os tempos das operações são colocados sobre os círculos (o tempo é comumente expresso em minutos). As operações são unidas por meio de arcos que representam a ordem com que o produto deve ser montado.

As figuras 9.25 (b) e (c) ilustram diagramas de precedência para a montagem da caneta esferográfica da figura 9.25 (a). No primeiro diagrama não fica totalmente claro que a montagem poderia ser iniciada pelas operações 1 ou 2; gerando mais de uma seqüência de montagem. Outras seqüências poderiam ser geradas, como na figura 9.25 (c).

Neste exemplo pode-se facilmente identificar que existem somente três restrições: a operação 2 deve ser realizada antes da 1 ($2 \rightarrow 1$), a 3 antes da 4 ($3 \rightarrow 4$) e a 1 antes das 3 e 5 ($1 \rightarrow 3$ e 5). Estas restrições já descartam seqüências geradas pelos diagramas de precedência das Figuras 3.7 (b) e (c). Em produtos mais complexos, decisões desta natureza requerem uma série de análises, tornando-se uma tarefa árdua e fatigante.

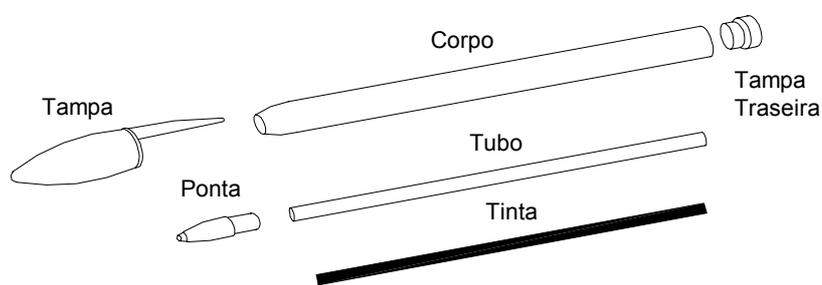
Os diagramas de precedência são amplamente utilizados pelas indústrias, principalmente pela sua simplicidade e facilidade de visualização. Eles são muito usados como ferramenta de apoio ao projeto de linhas de montagem e na realização do balanceamento das mesmas. Por permitir uma boa visualização, também auxiliam na escolha da(s) melhor(es) seqüência(s) de montagem, que muitas vezes é realizada para que se atinja o melhor balanceamento.

Existem estudos para a geração sistemática de diagramas de precedência, como o desenvolvido por Chen e Henrioud, (1994). Neste, os diagramas são construídos através de duas etapas; a primeira gera todas as operações possíveis (com intervenção humana), enquanto que a segunda automaticamente determina os diagramas de precedência. Apesar de existirem outros estudos desta natureza, a determinação de diagramas de precedência ainda depende, e muito, da intervenção de especialistas.

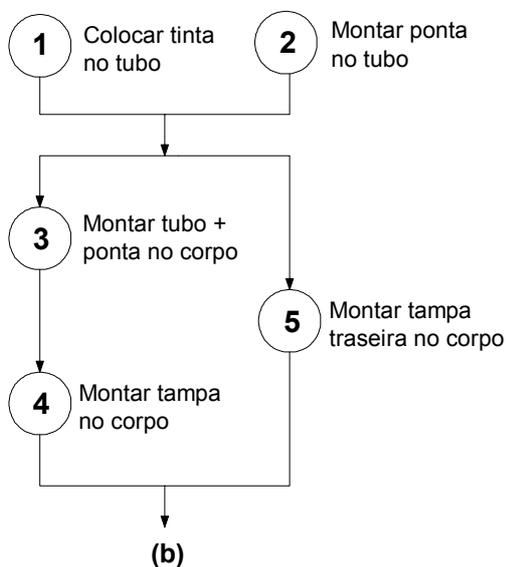
Não obstante a estes fatores, a representação por diagramas de precedência apresenta algumas limitações, como:

- os diagramas de precedência, por si só, não geram seqüências de montagem. Estas são geradas pelo analista; o que requer uma certa experiência do mesmo;
- para produtos complexos não consegue-se representar todas as seqüências possíveis através de um único diagrama de precedência;

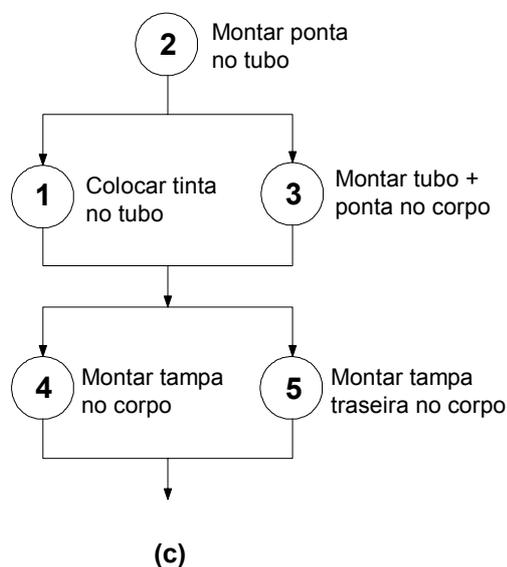
- um mesmo produto pode ser montado através de diferentes operações, que variam conforme a seqüência de montagem a ser empregada;
- algumas seqüências de montagem podem ser deixadas de lado, ou ainda, devido a pouca experiência do analista, seqüências de montagem impossíveis podem ser representadas, retardando o processo de planejamento da montagem;
- torna-se conveniente quando o projeto da linha de montagem for baseado em uma já existente. Porém, quando o objetivo for o projeto de uma nova linha de montagem para um produto de relativa complexidade, deve-se tomar um certo cuidado na sua utilização. Isto porque, mesmo para um analista experiente, fica difícil pressupor que a linha de montagem obtida de um diagrama de precedência, seja mais eficiente do que a resultante de outros.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.25 - (a) Peças constituintes de uma caneta esferográfica (b) e (c) Diagramas de precedência para a caneta da Figura (a).

REPRESENTAÇÃO POR DIAGRAMAS DE LIGAÇÃO

O diagrama de ligação, introduzido por Bourjault, (1984), é um gráfico que representa a conexão entre as peças em uma montagem. Cada nó representa uma peça, enquanto que cada arco ou ligação representa um contato entre as mesmas. Distinguem-se dois tipos de contatos entre as peças: contato físico e contato relacional. No contato físico, como o próprio nome indica, as peças encontram-se em contato físico uma com as outras. Já no contato relacional, representado pelas linhas tracejadas na figura 9.26, as peças possuem um importante relacionamento.

O diagrama de ligação não estabelece as relações de precedência entre as peças constituintes do produto. Basicamente, estas relações são estabelecidas através de análises em cima do mesmo e das restrições existentes. Apesar disto ele é muito útil para avaliação das conexões entre as peças, e por isto foi incluído nesta seção.

Os dados fornecidos por este diagrama servem de entrada para algoritmos e outros métodos para a geração da seqüência de montagem. Também servem de auxílio para a construção de diagramas de precedência e gráficos “e/ou”. A figura 9.26 ilustra o diagrama de ligação para a caneta esferográfica da figura 9.25 (a).

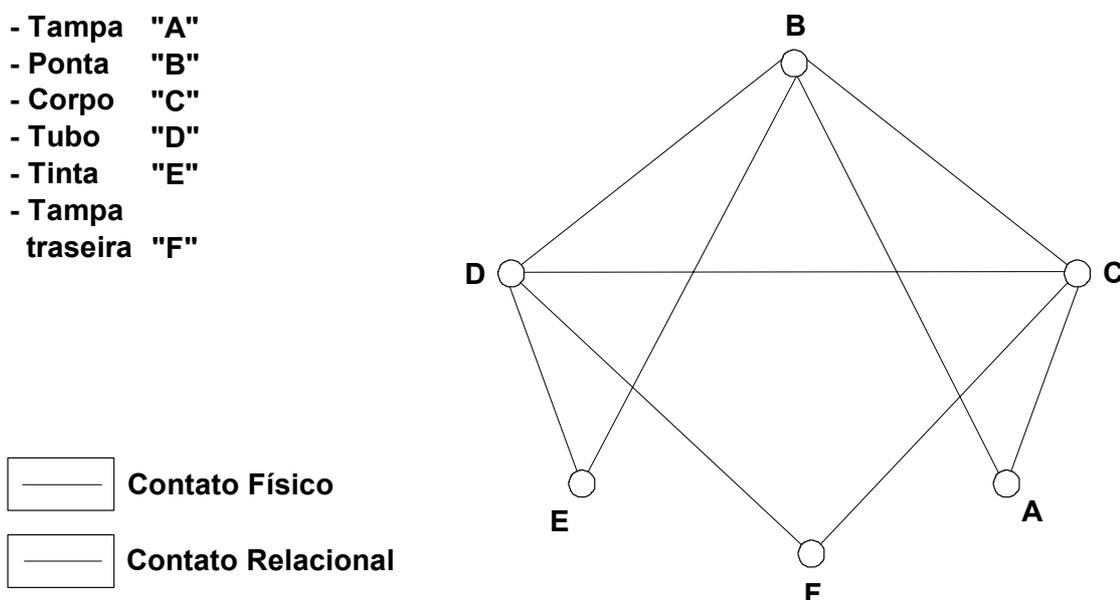


Figura 9.26 - Diagrama de ligação para a caneta esferográfica da figura 9.25 (a).

REPRESENTAÇÃO POR GRÁFICOS “E/OU”

O PSM de um produto composto de diversas peças pode ser tratado como um problema de procura, no espaço dos estados, de todas as configurações possíveis para um dado conjunto de peças. O estado inicial é a configuração na qual todas as peças estão desconectadas; enquanto que no estado final elas encontram-se devidamente unidas, formando o produto desejado. Os movimentos que levam de um estado a outro são correspondentes às operações de montagem, desde que cada uma delas mudem a posição relativa de apenas uma peça (Mello, 1986).

Neste contexto, qualquer conjunto de peças unidas que forme uma unidade estável é chamado de montagem. A palavra submontagem refere-se a uma montagem que é parte de outra, mais complexa, e sempre carrega a conotação de um subconjunto (Mello, 1986).

Existem muitas configurações que podem ser feitas a partir das mesmas peças. Considerando que se obtém mais ramificações do estado inicial para o final, do que a partir do estado final para o inicial; um encadeamento para trás é mais eficiente para a resolução do problema de planejamento da montagem. Sendo assim o problema de determinar como um produto será montado, converte-se para como o mesmo pode ser desmontado.

Como muitas operações de montagem não são necessariamente reversíveis, as equivalências dos dois problemas só existirá se cada operação utilizada na desmontagem seja o inverso de uma possível operação de montagem. A expressão operação de “desmontagem” refere-se, portanto, ao inverso de uma possível operação de montagem. A partir desta abordagem, torna-se impossível a geração de seqüências inviáveis, que retardam o processo de busca pela melhor solução.

Desta forma o problema de desmontar um produto, é decomposto em subproblemas distintos, cada um referente à desmontagem de uma submontagem. Se as soluções para os subproblemas puderem ser encontradas, então a solução para o problema original pode ser obtida pela combinação das soluções dos subproblemas e a operação utilizada na sua decomposição.

Estruturas conhecidas por gráficos “e/ou”, ou hipergráficos, são úteis para representar problemas de decomposição. Em um gráfico “e/ou” os nós correspondem às montagens, e os que contêm apenas uma peça são denominados nós terminais. Os hiperarcos (ou k-conectores, k sendo um inteiro maior que zero) correspondem às operações de desmontagem.

Uma árvore de solução para um nó N em um gráfico “e/ou”, é um subgráfico que deve ser definido a partir de N mais um de seus hiperarcos e o conjunto de árvores de solução dos nós sucessores a partir destes hiperarcos. Esta definição assume que o gráfico seja aberto, como acontece em um problema de desmontagem. Pode existir nenhuma, uma (no caso de N ser um nó terminal) ou muitas árvores de solução para um nó de um gráfico “e/ou”.

Para a aplicação no problema de montagem, esta representação possui a útil característica de incluir todas as possíveis disposições parciais das operações de montagem. Além disso, cada disposição parcial corresponde a uma árvore de solução de um nó correspondente ao produto final (montado). Ao contrário da utilização de diagramas de precedência, através de gráficos “e/ou” pode-se representar todas as seqüências de montagem teoricamente possíveis em um só diagrama. Este é um fator bastante positivo, pois garante que nenhuma seqüência seja deixada de lado sem uma análise prévia.

Em um gráfico “e/ou” qualquer submontagem é representada por um único nó, mesmo que ele possa ser obtido através de diferentes operações de desmontagem. Outro detalhe importante é que cada hiperarco corresponde a uma única operação de desmontagem, logo duas seqüências diferentes só incluem a mesma operação se árvores de soluções correspondentes possuírem o mesmo hiperarco.

A Figura 9.27 ilustra o gráfico “e/ou” para a caneta esferográfica da Figura 9.25 (a). Note que as três restrições citadas nos diagramas de precedência já foram consideradas neste gráfico. Os hiperarcos correspondentes a cada nó encontram-se identificados (1 a 9).

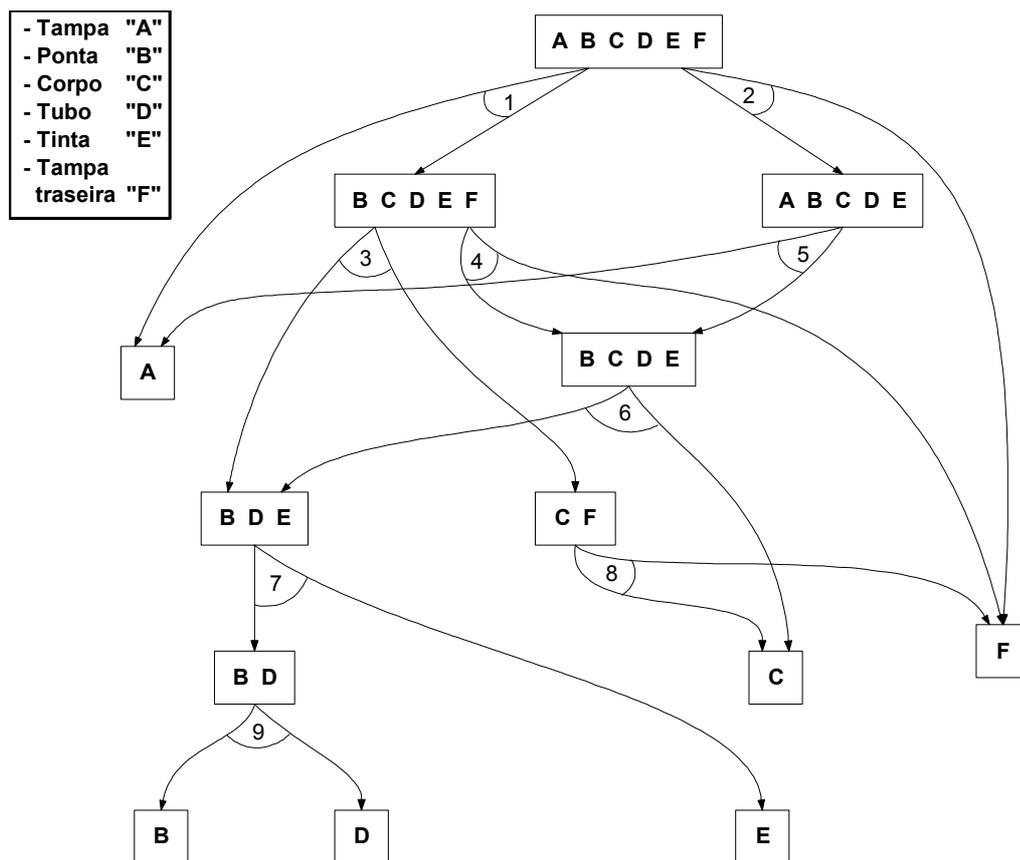


Figura 9.27 – Gráfico “e/ou” para a caneta esferográfica da Figura 9.25 (a).

9.8.2.2 - GERAÇÃO DAS SEQÜÊNCIAS DE MONTAGEM

O PSM consiste basicamente de três etapas: geração, avaliação e escolha das seqüências de montagem (vide figura 9.28). Durante a primeira etapa as seqüências de montagem são geradas com o auxílio de gráficos e análise da desmontagem do produto. Os gráficos mais utilizados são os diagramas de precedência, diagramas de ligação e gráficos “e/ou”. Ainda existem outros tipos de gráficos como os apresentados por Whitney & Fazio (1987) e Ullman (1992), que nada mais são do que uma adaptação dos gráficos “e/ou”, e os diagramas de desmontagem propostos por Dewhurst & Subramani (1991).

A avaliação das seqüências é realizada em cima de diversos critérios (como tempos de montagem, ergonomia, balanceamento, entre outros), que podem ser classificados através de pesos conforme a sua influência na montagem do produto, e aos quais são atribuídas notas. Desta forma é possível adaptar os critérios de julgamento ao produto e tipo de montagem a ser realizado.

A escolha da(s) melhor(s) seqüência(s) ocorre em função dos critérios preestabelecidos na segunda etapa. Realiza-se um somatório das notas atribuídas a cada um dos critérios para todas as seqüências possíveis, e escolhe-se a que melhor atender às exigências.

Com o intuito de diminuir o número total de seqüências a serem avaliadas, o especialista pode realizar uma análise baseada na experiência adquirida e eliminar todas as que sejam indesejáveis. Esta ação facilita as duas últimas etapas, permitindo que o mesmo concentre seus esforços no estudo das seqüências que apresentarem um maior potencial.

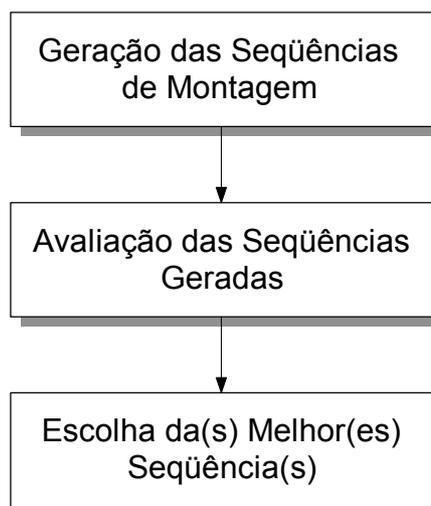


Figura 9.28 – Etapas básicas para a realização do PSM (Paupitz, 2000).

Dentro do PSM a heurística é utilizada para a geração e redução do número total das seqüências de montagem.

Pode-se utilizar uma etapa paralela à geração e avaliação das seqüências de montagem: o agrupamento das peças (vide figura 9.29). O agrupamento das peças visa reduzir o número de combinações possíveis e fornece a possibilidade de representar planos de montagem mais abstratos. Boneschanscher & Heemskerk (1989) definiram um grupo como sendo:

“Um conjunto de peças que possuem um inter-relacionamento lógico devido a detalhes de montagem em comum, através dos quais elas possam ser unidas. Um ponto chave, é que a seqüência de montagem dentro de um grupo não pode ser interrompida por peças estranhas ao mesmo. Dependendo do tipo de grupo, a seqüência de montagem das peças deve ser fixa ou determinada em um estágio posterior”.

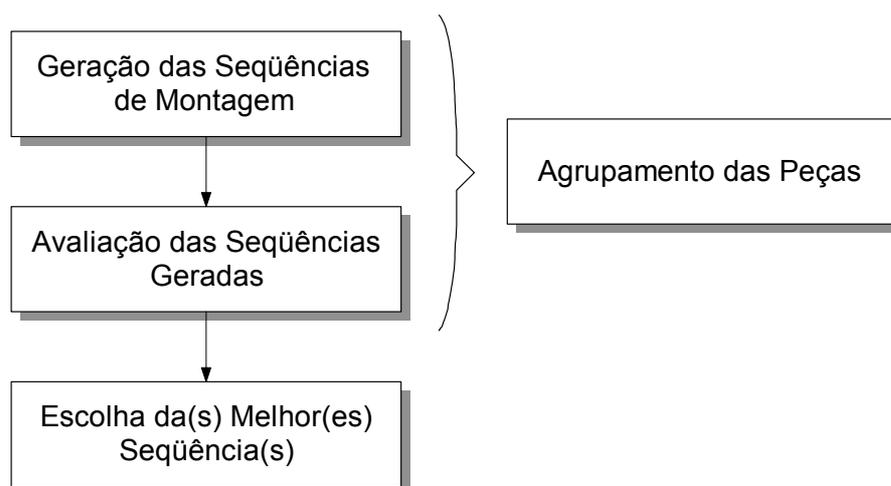


Figura 9.29 - Etapas básicas com o agrupamento de peças (Paupitz, 2000).

Através da formação de grupos de peças diminui-se consideravelmente a complexidade das etapas de geração e avaliação das seqüências de montagem. Cada grupo é considerado como uma peça, dentro do qual existe uma seqüência de montagem preestabelecida.

Desta forma, para um produto de 10 peças (A, B, ..., J), com dois grupos de quatro peças cada (K e L), a análise é realizada primeiramente para os dois grupos e depois parte-se para a etapa final com um produto de apenas 4 peças (vide figura 9.30).

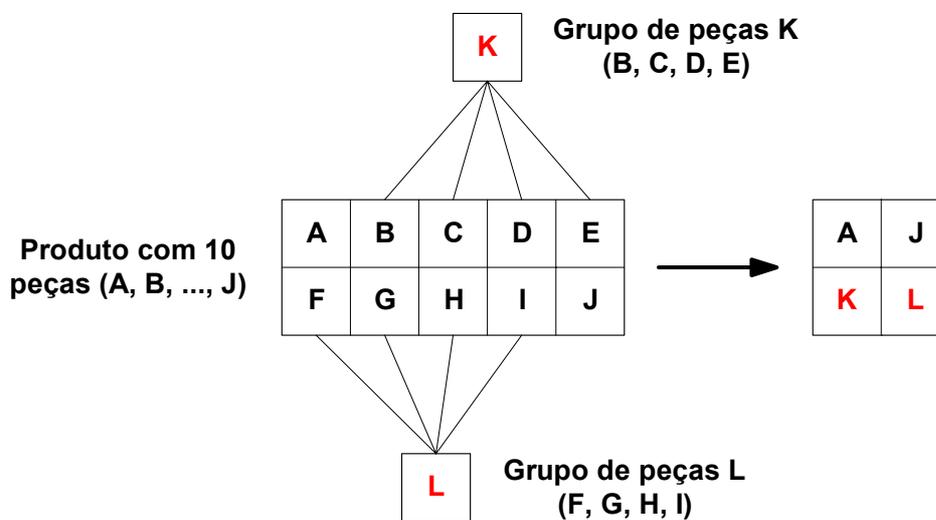


Figura 9.30 – Exemplo da simplificação obtida no PSM, através da utilização do conceito de grupos de peças (Paupitz, 2000).

Para a geração das seqüências de montagem, pode-se dispor de método gráfico, algorítmico e da heurística. Considerando-se este último caso, o método de Whitney e De Fazio (Whitney & Fazio, 1987) é um dos mais conhecidos. Ele é baseado nos diagramas de ligação e em uma série de perguntas relativas a cada uma das ligações demonstradas neste diagrama. Neste caso, a heurística é utilizada para determinar as relações de precedência e conseqüentemente na construção de um gráfico que engloba todas as seqüências de montagens possíveis para um determinado produto.

A metodologia proposta por Whitney & Fazio (1987) é baseada no método proposto por Bourjault (1984), e consiste em construir um diagrama de ligação para o grupo em questão. Em seguida, para cada uma das ligações faz-se as seguintes perguntas:

- P1) Qual (is) ligação (ões) deve (m) ser realizada (s) antes da ligação "i"?
- P2) Qual (is) ligação (ões) não pode (m) ser realizada (s) antes da ligação "i"?

As respostas são as relações de precedência, que podem ser representadas através de combinações lógicas como nos exemplos a seguir:

a) P1 para a ligação 10?

As ligações 3 e 7 ou 8 devem ser realizadas antes da 10, ou seja:

$$3 \text{ e } (7 \text{ ou } 8) \rightarrow 10$$

b) P2 para a ligação 10?

As ligações 5 e 9 não podem ser realizadas antes da 10, ou seja:

$$10 \rightarrow 5 \text{ e } 9$$

O número de ligações está relacionado com o número de peças através da seguinte fórmula (Nevins & Whitney, 1989):

$$(n - 1) \leq l \leq \left(\frac{n^2 - n}{2} \right) \quad (9.5)$$

onde “ n ” é o número de peças e “ l ” o número de ligações. Logo para um grupo com 6 peças ter-se-á entre 5 e 15 ligações, o que representa um número de questões a serem respondidas entre 10 e 30.

As etapas de avaliação e escolha seguem o mesmo princípio da abordagem anterior, mas pode-se dizer que de uma maneira mais estruturada, onde os critérios de avaliação são organizados em formas de regras/perguntas. As regras heurísticas são desenvolvidas através da intuição, experiência e julgamento próprio. Elas não necessariamente resultam na melhor ou solução ótima, são de domínio público e evoluíram através dos anos pela experiência adquirida na resolução dos problemas. A seguir serão expostos dois exemplos extraídos de Heemskerk (1989):

Heurística de Acessibilidade: visa eliminar as seqüências que possam resultar em colisões entre as peças/produtos. Exemplo de regra: a montagem da peça “A” impede a montagem de outra peça?

Heurística de Estabilidade: visa eliminar as seqüências que levem a submontagens instáveis. Exemplo de regra: Existem submontagens instáveis no produto?

Através desta abordagem, pode-se criar um banco de dados com regras relativas aos diversos critérios de avaliação. Algumas destas regras podem ser eliminatórias e diretamente descartar algumas seqüências “indesejáveis”, como as que exijam grande número de elementos de fixação ou as que necessitam de diversas reorientações. Esta primeira análise, juntamente com a criação de grupos, contribui significativamente para a diminuição do número total de seqüências de montagem a serem avaliadas.

A escolha final pode ser feita atribuindo-se pesos aos critérios, que por sua vez também podem possuir pesos diferenciados para cada uma de suas regras.

9.8.3 – EXEMPLO: GRUPO DO BRAÇO INFERIOR DE SUSPENSÃO

Este grupo é composto por oito peças distintas (vide Figura 5), sendo que existe uma simetria entre a montagem dos braços inferiores de suspensão direito e esquerdo. A seguir encontram-se listadas as peças constituintes deste grupo:

- a) Agregado (elemento base – grande número de interfaces e maior peça);
- b) Parafuso longo;
- c) Arruela;
- d) Porca;
- e) Parafuso traseiro;
- f) Cantoneira fixação reforço;
- g) Porca auto travante;
- h) Braço inferior de suspensão.

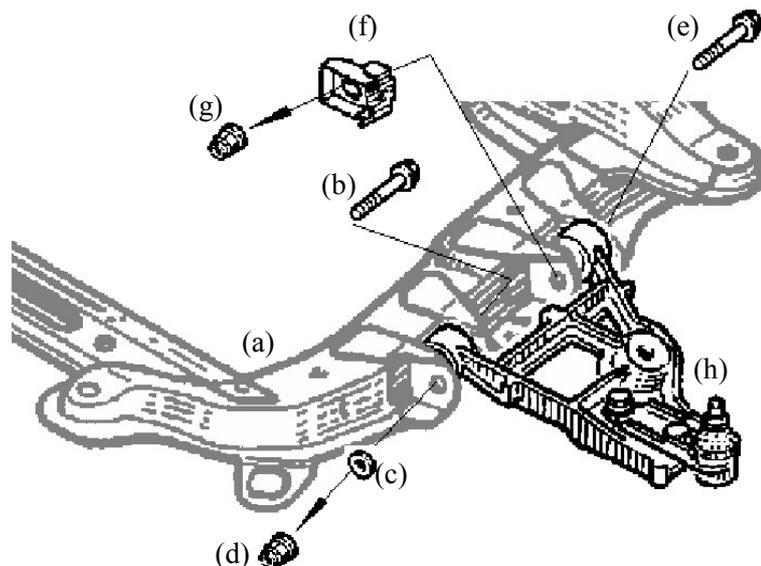


Figura 9.31 - Desenho em explosão das peças constituintes do grupo braço inferior de suspensão (Paupitz, 2000).

Conforme a fórmula anteriormente descrita, o número de ligações está compreendido entre 7 e 28 para uma montagem com oito peças. O diagrama de ligação para este exemplo possui treze ligações e é representado na figura 9.32.

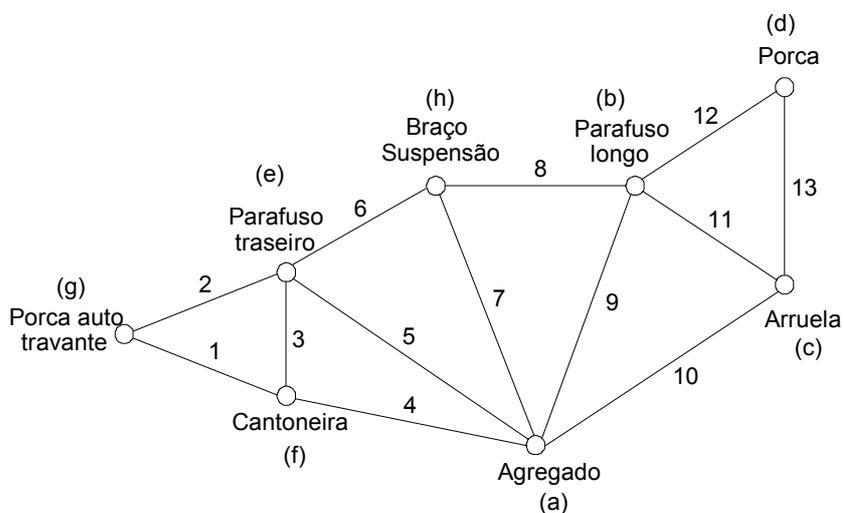


Figura 9.32 - Diagrama de ligação para a montagem do braço inferior de suspensão (Paupitz, 2000).

Análise das relações de precedência

- Respostas a P1:
- Ligação 1: 2, 3, 4, 5, 6, 7 → 1
- Ligação 2: 3, 4, 5, 6, 7 → 2
- Ligação 3: 4, 5, 6, 7 → 3
- Ligação 4: 0 → 4
- Ligação 5: 7 → 5
- Ligação 6: 5, 7 → 6
- Ligação 7: 0 → 7

- Ligação 8: 7, 9 → 8
- Ligação 9: 7 → 9
- Ligação 10: 7, 8, 9, 11 → 10
- Ligação 11: 7, 8, 9 → 11
- Ligação 12: 7, 8, 9, 10, 11 → 12
- Ligação 13: 7, 8, 9, 10, 11, 12 → 13

3 Começar pelas ligações 4 ou 7.

• Respostas a P2:

- Ligação 1: 1 → 0
- Ligação 2: 2 → 1
- Ligação 3: 3 → 1, 2
- Ligação 4: 4 → 1, 2, 3, 5, 6
- Ligação 5: 5 → 1, 2, 3, 6
- Ligação 6: 6 → 1, 2, 3
- Ligação 7: 7 → 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13
- Ligação 8: 8 → 10, 11, 12, 13
- Ligação 9: 9 → 8, 10, 11, 12, 13
- Ligação 10: 10 → 12, 13
- Ligação 11: 11 → 10, 12, 13
- Ligação 12: 12 → 13
- Ligação 13: 13 → 0

3 As últimas ligações devem ser a 1 ou a 13.

Partindo destas relações de precedência e considerando o agregado como elemento base, construiu-se o diagrama da figura 9.33. Este diagrama apresenta 48 diferentes seqüências que podem ser seguidas para a montagem das peças do grupo do braço inferior de suspensão.

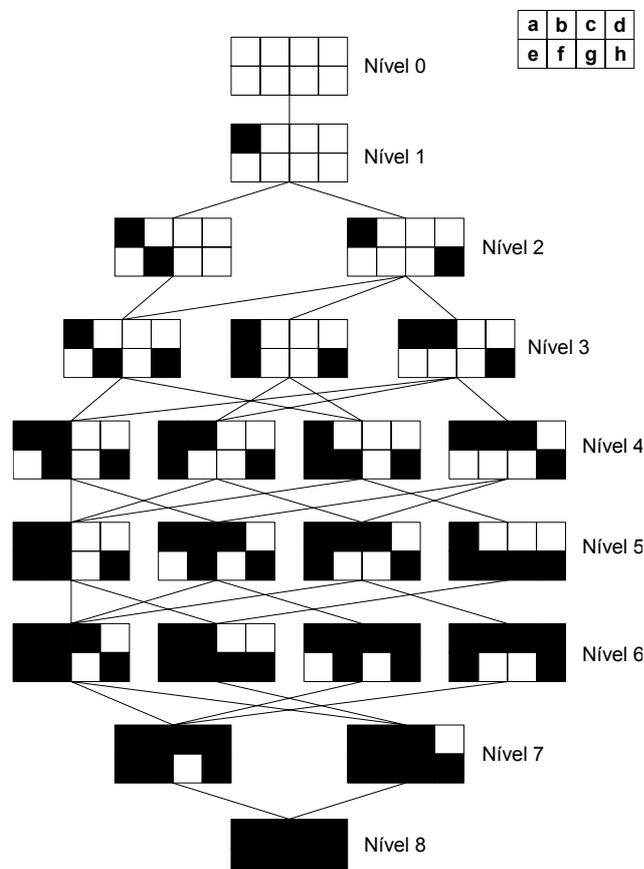


Figura 9.33 - Diagrama inicial representando todas as 48 seqüências possíveis para a montagem do braço inferior de suspensão (Paupitz, 2000).

Neste diagrama considera-se que as porcas estão somente pré-aparafusadas e o seu aperto se dará após a montagem de todas as peças.

A figura 9.34 foi construída a partir do diagrama inicial (figura 9.33) e levando-se em consideração as seguintes imposições de processo:

- Após a montagem do berço, o operador vai estar com todas as peças restantes na mão. Para a montagem do braço de suspensão esquerdo, o operador vai estar com a cantoneira e o braço de suspensão na mão esquerda e demais peças na mão direita;
- A segunda peça a ser montada deve ser o braço inferior devido ao seu tamanho;
- Para garantir o bom posicionamento e facilitar a montagem da cantoneira, ela deve ser montada antes do parafuso curto;
- Por questões de estabilidade, o parafuso curto deve ser montado logo após a cantoneira.

Com a aplicação destas imposições chegou-se a apenas quatro seqüências possíveis na figura 9.34. Se considerarmos ainda que é mais prático montar o parafuso longo logo após o curto, chegaremos a apenas três seqüências de montagem. Para conseguir o melhor gesto, é aconselhável que se monte a arruela após o parafuso longo e em seguida a porca. Desta forma ficamos com apenas uma seqüência de montagem para este grupo:

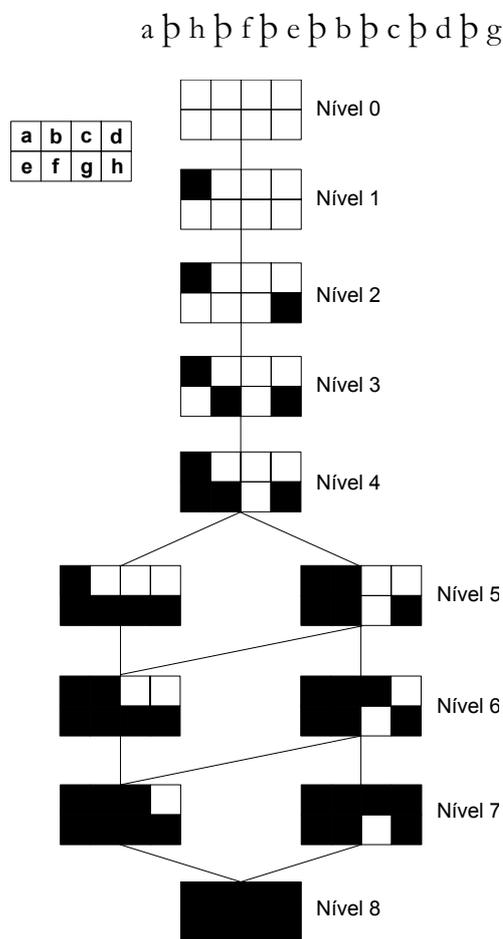


Figura 9.34 - Diagrama resultante após a aplicação das imposições de processo. Apenas quatro seqüências possíveis (Paupitz, 2000).

9.12 - REFERÊNCIAS

- ANDREASEN, M. M., KÄHLER, S., LUND, T. & SWIFT, K. G.. Design for Assembly, 2^o ed. 1988.
- ASHLEY, S.. Cutting Costs and Time with DFMA. Mechanical Engineering, March, 1995.
- BAARTMAN, J. P.. Automation of Assembly Operations on Parts. Dissertation T. U. Delft, 1995.
- BAKERJIAN, R.. Tool and Manufacturing Engineers Handbook. Society of Manufacturing Engineers, Vol. 6, 4th ed., 1992.
- BONESCHANSCHER, N. & HEEMSKERK, J. M.. Grouping Parts to Reduce the Complexity of Assembling Sequence Planning. INCOM 89, 6th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology. Madrid, September 1989.
- BOOTHROYD, G.. Design for Economic Manufacture. Annals of the CIRP, vol. 28/1/1979, pp. 345, 1979.
- BOOTHROYD, G.. Making it Simple – Design for Assembly. Mechanical Engineering, February, 1988.
- BOOTHROYD, G. & ALTING, L. “Design for Assembly and Disassembly”. Annals of the CIRP, vol. 41/2/1992, pp. 625, 1992.
- BOOTHROYD, G.. Product Design for Manufacturing and Assembly. Computer Aided Design, vol. 26, n^o 7, July 1994.
- BOOTHROYD, G., DEWURST, P. & KNIGHT, W.. Product Design for Manufacture and Assembly. Marcel Dekker Inc. New York, 1994.
- BOURJAULT, A.. Contribution a une Approche Méthodologique de L’Assemblage Automatisé: Elaboration Automatiques des Séquences Opératoires. Thèse d’État, Université de Franche-Comté. Besancon, France, Novembre, 1984.
- BRALLA, J. G.. Handbook of Product Design for Manufacturing: A Practical Guide to Low-Cost Production. McGraw-Hill Book Company, 1986.
- CHEN, K. & HENRIOUD, J. M.. Systematic Generation of Assembly Precedence Graphs. Proceedings of the IEEE ICRA, May 1994.
- DEWURST, P. & SUBRAMANI, A. K.. Automatic Generation of Product Disassembly Sequences. Annals of the CIRP, vol. 40/01/1991, pp. 115, 1991.
- HAUSER, J. R & CLAUSING, D.. “The House of Quality”. Harvard Business Review, Mai-June, 1988.
- HEEMSKERK, C. J. M.. The Use of Heuristics in Assembly Sequence Planning. Annals of the CIRP, vol. 38/01/89, pp. 37, 1989.
- HITOMI, K.. Manufacturing Systems Engineering: A Unified Approach to Manufacturing Technology and Production Management. London, Taylor & Francis Ltd, 1979.
- LITTLE, D. & HEMMINGS, A.. Scheduling Automated Assembly Systems. Journal of Assembly Automation, 1996.
- MELLO, L. H. & SANDERSON, A.. And/Or Graph representation of Assembly Plans. AAAI - 86, Proceedings of the 5th Nat’l Conference on AI. Robotics Institute, Carnegie-Mellon, April, 1986.
- NEVINS, J. L. & WHITNEY, D. E.. Concurrent Design of Products and Process; A Strategy for the Next Generation in Manufacturing. McGraw-Hill Publishing Company, 1989.

- OLIVEIRA, D. L. M.. Estudo Sistematizado das Técnicas de PPM - Projeto para Montagem. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.
- PAHL, G. & BETZ, W.. Engineering Design: A Systematic Approach. The Design Council, 1988.
- PAUPITZ, A.. Sistematização do Planejamento da Seqüência de Montagem de Produtos Industriais. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.
- POLI, C. & FENOGLIO, F.. Designing Parts for Automatic Assembly. Machine Design, December, 1987.
- POLI, C., GRAVES, R & GROPPETTI, R.. Rating Products for Ease of Assembly. Machine Design, August 1986.
- SOUSA, A. G.. Estudo e Análise dos Métodos de Avaliação da Montabilidade de Produtos Industriais no Processo de Projeto. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- ULLMAN, D. G.. The Mechanical Design Process, McGraw-Hill International Editions, 1992.
- WHITNEY, D. E. & FAZIO, T. L.. Simplified Generation of all Mechanical Assembly Sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, nº 6, December 1987.