

# Manufatura celular

## CONTEÚDO DO CAPÍTULO

- 18.1 Famílias de peças
- 18.2 Classificação e codificação de peças
  - 18.2.1 Características dos sistemas de classificação e codificação de peças
  - 18.2.2 O sistema Opitz de classificação e codificação de peças
- 18.3 Análise do fluxo de produção
- 18.4 Manufatura celular
  - 18.4.1 Conceito de peça composta
  - 18.4.2 Projeto de célula de manufatura
- 18.5 Aplicações da tecnologia de grupo
- 18.6 Análise quantitativa na manufatura celular
  - 18.6.1 Agrupando peças e máquinas por ordem de classificação
  - 18.6.2 Dispondo máquinas em uma célula de tecnologia de grupo (TG)

Nos Estados Unidos, estima-se que, constituindo mais de 50 por cento da atividade de manufatura total, a forma mais comum de produção seja a manufatura em lote. Daí a importância de torná-la o mais eficiente e produtiva possível. Além disso, há uma tendência de integrar as funções de projeto e manufatura em uma empresa. Uma abordagem direcionada a ambos os objetivos é a tecnologia de grupo (TG; do inglês, *technology group* — GT).

A *tecnologia de grupo* é uma filosofia de manufatura na qual as peças semelhantes são identificadas e agrupadas para tirar vantagem de suas similaridades em projeto e produção. Elas são dispostas em famílias, e cada *família de peças* possui características de manufatura e/ou projeto parecidos. Por exemplo, uma planta produzindo 10 mil diferentes tipos de peças pode ser capaz de agrupar a maioria dessas peças em 30 ou 40 famílias distintas. É razoável

acreditar que o processamento de cada membro de uma determinada família é similar, o que deve resultar em eficiências de manufatura, as quais são geralmente alcançadas dispondo os equipamentos de produção em grupos de máquinas, ou células, para facilitar o fluxo de trabalho. A organização do equipamento de produção em células, nas quais cada célula se especializa na produção de uma família de peças, é chamada de *manufatura celular*, exemplo de modelo de produção misto (Seção 13.2.5). As origens da tecnologia de grupo e da manufatura celular remontam ao ano de 1925, aproximadamente (Nota histórica 18.1).

A tecnologia de grupo e a manufatura celular são aplicáveis a uma gama de situações de manufatura. A TG é mais adequada sob as condições a seguir:

- A planta atualmente utiliza um modelo de produção tradicional em lotes e um layout por processos, o que

resulta em considerável esforço de manuseio de material, alto estoque de itens em andamento e longos tempos de processamento de manufatura.

- *As peças podem ser agrupadas em famílias de peças.* Condição necessária em que cada célula é projetada para produzir uma determinada família de peças ou uma coleção limitada de famílias, de maneira que tem de ser possível agrupar as peças feitas na planta em famílias. Felizmente, na típica planta de produção de médio volume, a maioria das peças pode ser agrupada em famílias.

Há duas iniciativas importantes para uma empresa ao implementar a tecnologia de grupo, que representam obstáculos significativos para a aplicação da TG.

1. *Identificar as famílias de peças.* Se a planta produz 10 mil peças diferentes, fazer uma revisão de todos os desenhos de peças e agrupá-las em famílias é uma tarefa substancial e que consome tempo.
2. *Rearranjar máquinas de produção em células.* Planejar e realizar o rearranjo é uma iniciativa cara, que consome tempo e interrompe a produção das máquinas durante a troca.



## Nota histórica 18.1

### Tecnologia de grupo

Em 1925, R. Flanders, dos Estados Unidos, apresentou um estudo para a American Society of Mechanical Engineers que descreveu uma maneira de organizar a manufatura na Jones and Lamson Machine Company que atualmente seria chamada de tecnologia de grupo. Em 1937, A. Sokolovskiy da então União Soviética descreveu as características essenciais da tecnologia de grupo propondo que peças de configuração similar fossem produzidas por uma sequência de processo padronizada, permitindo desse modo que técnicas de fluxo de linha fossem utilizadas para trabalhos normalmente realizados por produção em lotes. Em 1949, A. Korling, da Suécia, apresentou um estudo em Paris sobre 'produção em grupo', cujos princípios são uma adaptação das técnicas de linha de produção para a manufatura em lotes. No estudo, descreveu como descentralizar o trabalho em grupos independentes, cada um contendo máquinas e ferramentas para produzir 'uma categoria especial de peças'.

Em 1959, o pesquisador S. Mitrofanov, da União Soviética, publicou um livro intitulado *Scientific principles of group technology*, que foi amplamente lido e é considerado responsável por mais de 800 plantas na União Soviética utilizando tecnologia de grupo já em 1965. Na Alemanha, o pesquisador H. Opitz estudou peças manufaturadas pela indústria de ferramentas de máquinas alemã e desenvolveu o sistema de classificação e codificação de peças que leva seu nome e é bastante utilizado no caso de peças usinadas (Seção 18.2.2).

Nos Estados Unidos, a primeira aplicação da tecnologia de grupo foi feita por volta de 1969 na empresa Harris-Intertype (Langston Division) em Nova Jersey. Tradicionalmente uma fábrica arranjada com um *layout* por processo, a empresa reorganizou-se em linhas de 'famílias de peças', cada uma especializada em produzir determinada configuração de peça. Famílias de peças foram identificadas com fotos de cerca de 15 por cento das peças feitas na planta e seu agrupamento em famílias. Quando as mudanças foram implementadas, melhoraram a produtividade em 50 por cento e reduziram os tempos de processamento de semanas para dias.

A tecnologia de grupo oferece benefícios substanciais para empresas que têm o objetivo de implementá-la.

- A TG promove a padronização das ferramentas, dos sistemas de fixação e das preparações dos equipamentos.

- O manuseio de materiais é reduzido porque as distâncias dentro de uma célula são muito mais curtas do que na fábrica inteira.

- O planejamento de processos e cronograma de produção são simplificados.

- Os tempos de preparação são reduzidos, resultando em tempos de processamento mais baixos.
- O trabalho em andamento (do inglês, *work-in-process* — WIP) é reduzido.
- A satisfação dos trabalhadores geralmente melhora quando eles colaboram em uma célula TG.
- Um trabalho de maior qualidade é conquistado com a utilização da tecnologia de grupo.

Neste capítulo, discutimos tecnologia de grupo, manufatura celular e tópicos relacionados. Vamos começar com a definição de um conceito fundamental em tecnologia de grupo: famílias de peças.

## 18.1 FAMÍLIAS DE PEÇAS

A família de peças é uma coleção de peças similares seja em formato geométrico e tamanho ou nos passos de processamento exigidos em sua manufatura. As peças dentro de uma família são diferentes, mas suas similaridades são próximas o suficiente para merecer sua inclusão como membros da família de peças. As figuras 18.1 e 18.2 mos-

tram duas famílias de peças diferentes. As duas peças na Figura 18.1 são bastante similares em termos de projeto geométrico, mas diferentes em termos de manufatura, devido a diferenças em tolerâncias, quantidades de produção e materiais. As peças mostradas na Figura 18.2 constituem uma família de peças na manufatura, mas suas geometrias diferentes as fazem parecer bastante diferentes a partir de um ponto de vista do projeto.

Em termos de manufatura, uma das vantagens importantes do agrupamento de peças em famílias pode ser explicada com relação às figuras 18.3 e 18.4. A Figura 18.3 mostra uma planta com *layout* por processos para produção em lotes em um setor de usinagem. As várias máquinas-ferramenta são arranjadas por função. Há um departamento de tornos, um de fresadoras, um de furadeiras e assim por diante. Para a usinagem de uma determinada peça, ela tem de ser transportada entre os departamentos, e talvez visitar o mesmo departamento diversas vezes. Isso resulta em considerável manuseio de materiais, grandes estoques de itens em andamento, muitas preparações de máquinas, longo tempo de processamento e alto custo. A Figura 18.4 mostra uma fábrica de capacidade equivalen-

Figura 18.1 Duas peças de formato e tamanho idênticos, mas com diferentes requisitos de manufatura:  
(a) 1 milhão itens/ano, tolerância de  $\pm 0,01$  polegadas, material de aço-cromo 1015 niquelado e  
(b) cem itens/ano, tolerância de  $\pm 0,001$  polegadas, material de aço inoxidável de liga 18/8

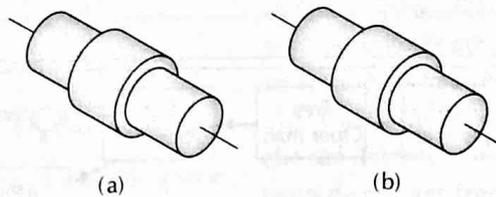


Figura 18.2 Uma família de peças com requisitos de manufatura similares, mas diferentes atributos de projeto. Todas as peças são usinadas a partir de materiais cilíndricos por torneamento; algumas exigem furação e/ou fresamento

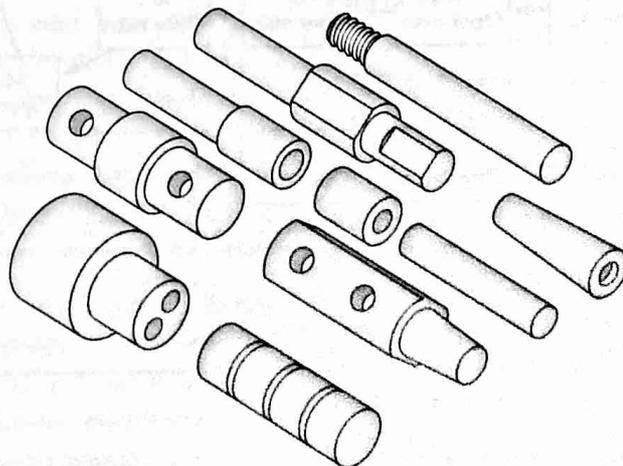
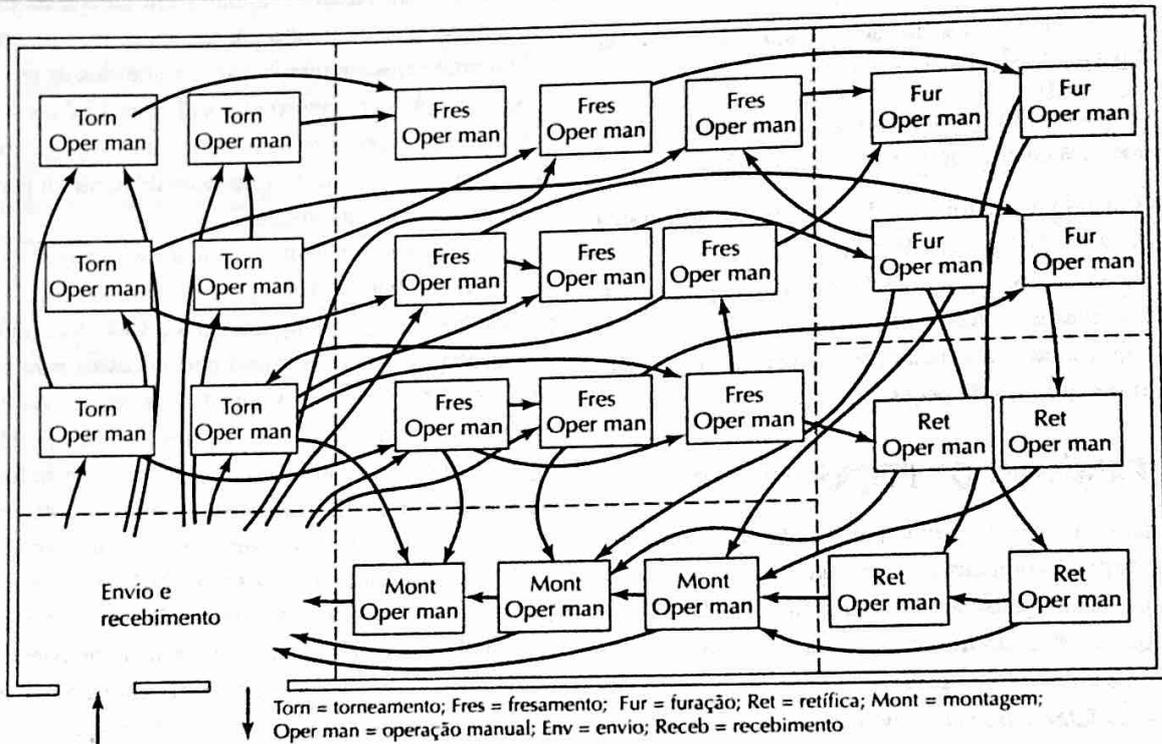
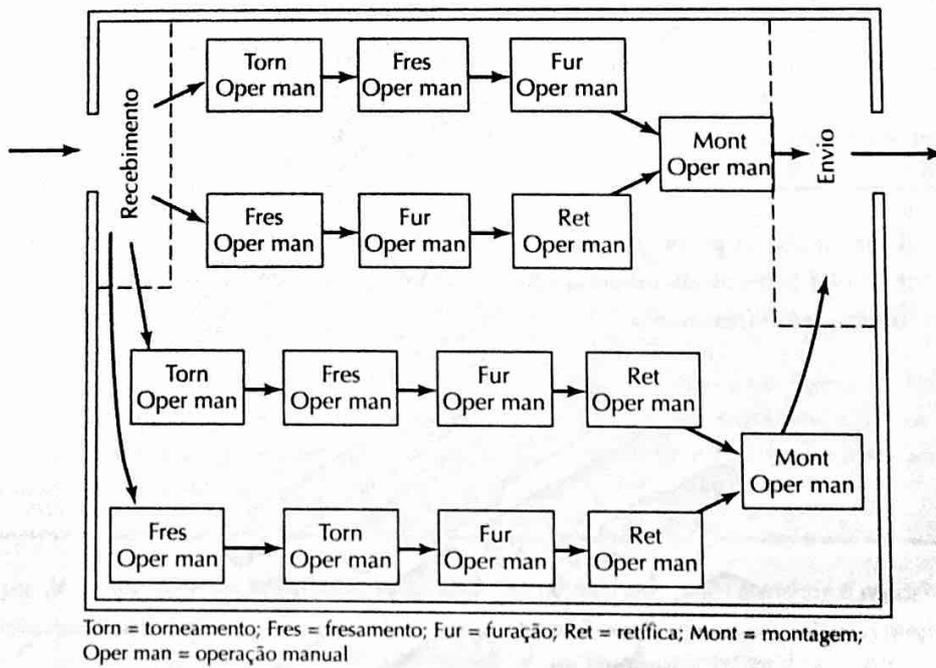


Figura 18.3 *Layout de planta por processo*



Legenda: as setas indicam o fluxo de trabalho pela planta e as linhas pontilhadas indicam a separação de máquinas em departamentos

Figura 18.4 *Layout de tecnologia de grupo*



Legenda: as setas indicam o fluxo de trabalho nas células

te, que tem as máquinas arranjadas em células. Cada célula é organizada para se especializar na produção de uma família de peças em particular. As vantagens estão na forma de manuseio de peças reduzido, nos tempos de preparação menores, em menos preparações (em alguns casos, nenhuma mudança de configuração é necessária), em menos estoque de itens em andamento e em tempos de processamento mais curtos.

O maior obstáculo individual na mudança para a tecnologia de grupo de uma fábrica de produção convencional é o problema de agrupar as peças em famílias. Há três métodos gerais para a solução do problema. Todos consomem tempo e envolvem a análise de grande quantidade de dados por pessoal adequadamente treinado. São eles: (1) inspeção visual, (2) classificação e codificação de peças e (3) análise do fluxo de produção. Vamos fornecer uma breve descrição do método de inspeção visual e então examinar detalhadamente o segundo e terceiro métodos.

O método de inspeção visual é o método menos sofisticado e menos caro. Ele envolve a classificação de peças em famílias olhando as peças físicas ou fotos e as dispondo em grupos com características similares. Apesar de ser geralmente considerado o menos preciso, foi o método utilizado em um dos primeiros casos de sucesso de TG nos Estados Unidos na empresa Harris Intertype (Langston Division), em Cherry Hill, Nova Jersey [20] (Nota histórica 18.1).

## 18.2 CLASSIFICAÇÃO E CODIFICAÇÃO DE PEÇAS

Método que mais consome tempo, na *classificação e codificação de peças*, similaridades entre as peças são identificadas e relacionadas em um sistema de codificação. Duas categorias de similaridades de peças podem ser distinguidas: (1) atributos de projeto, que dizem respeito a características de peças como geometria, tamanho e material, e (2) atributos de manufatura, que consideram os passos de processamento exigidos para fazer uma peça. Embora os atributos de projeto e manufatura de uma peça sejam normalmente correlacionados, a correlação não é perfeita. Geralmente, sistemas de classificação e codificação são projetados para a inclusão tanto de atributos de projeto como de atributos de manufatura de uma peça. Estão entre as razões para incluir um esquema de codificação:

- *Recuperação de projetos.* Um projetista diante da tarefa de desenvolver uma peça nova pode utilizar um sistema de recuperação de projetos para determinar se já existe alguma similar. A simples mudança de uma peça existente exige muito menos tempo do que o projeto de uma peça a partir do zero.

- *Planejamento de processo automatizado.* O código para uma nova peça pode ser utilizado na procura por planos de processo para peças existentes com códigos idênticos ou similares.

- *Projeto de célula.* Os códigos das peças podem ser utilizados para projetar células capazes de produzir todos os membros de uma família de peças em particular, utilizando o conceito de peças compostas (Seção 18.4.1).

Para realizar a classificação e a codificação de peças, um analista tem de examinar os atributos de projeto e/ou manufatura de cada peça. Às vezes o exame é feito pela procura, em tabelas, para casar as características da peça em questão com as características nelas descritas e diagramadas. Uma abordagem alternativa e mais produtiva envolve um sistema de classificação e codificação computadorizado, no qual o usuário responde a questões feitas pelo computador. Com base nas respostas, o computador designa o número de código para a peça. Qualquer que seja o método utilizado, a classificação identifica de maneira única os atributos das peças.

O procedimento de classificação e codificação pode ser realizado na lista inteira de peças ativas produzidas pela empresa ou algum tipo de procedimento de amostragem pode ser utilizado para estabelecer famílias de peças. Por exemplo, peças produzidas na fábrica durante um período de tempo poderiam ser examinadas para identificar categorias de famílias de peças. O problema com qualquer procedimento de amostragem é arriscar que possa não ser representativa da população.

Uma série de sistemas de classificação e codificação são descritos na literatura [15], [18] e [30] e um número de pacotes (programas) de codificação comerciais foram desenvolvidos; entretanto, nenhum dos sistemas foi universalmente adotado. Uma das razões é que o sistema de classificação e codificação tem de ser personalizado porque os produtos de cada empresa são únicos. Um sistema bom para uma empresa pode não ser tão bom para outra.

### 18.2.1 Características de sistemas de classificação e codificação de peças

As principais áreas funcionais que utilizam um sistema de classificação e codificação de peças são as de projeto e manufatura. Normalmente, sistemas de classificação de peças caem em uma de três categorias:

1. Sistemas baseados em atributos do projeto de peças.
2. Sistemas baseados em atributos de manufatura de peças.
3. Sistemas baseados tanto em atributos do projeto como de manufatura.

A Tabela 18.1 apresenta uma lista dos atributos de projeto e manufatura geralmente incluídos em esquemas de classificação. Existe certa sobreposição entre os atributos de projeto e manufatura, já que a geometria de peça é, em grande parte, determinada pela sequência de processos de manufatura nela realizadas.

Em termos de significado dos símbolos no código, há três estruturas utilizadas nos esquemas de classificação e codificação:

1. *Estrutura hierárquica*, também conhecida como *monocódigo*, na qual a interpretação de cada símbolo sucessivo depende do valor dos anteriores.
2. *Estrutura do tipo cadeia*, também conhecido como *poli-código*, na qual a interpretação de cada símbolo na sequência é sempre o mesmo, isto é, não depende do valor dos anteriores.
3. *Estrutura de modo misto*, um híbrido dos dois esquemas de codificação anteriores.

Para distinguir as estruturas hierárquicas e o tipo cadeia, considere um número de código de dois dígitos para uma peça, como 15 ou 25. Suponha que o primeiro dígito represente o formato geral da peça: 1 significa que a peça é cilíndrica (rotacional) e 2 significa que a geometria é

prismática. Em uma estrutura hierárquica, a interpretação do segundo dígito depende do valor do primeiro. Se precedido por 1, o 5 pode indicar uma razão entre comprimento e diâmetro; se precedido por 2, o 5 pode indicar a razão entre as dimensões de comprimento e largura da peça. Na estrutura do tipo cadeia, o símbolo 5 teria o mesmo significado se fosse precedido por 1 ou 2. Por exemplo, ele poderia indicar o comprimento total da peça. A vantagem da estrutura hierárquica é que, em geral, mais informações podem ser incluídas em um código com determinado número de dígitos. A estrutura de modo misto utiliza uma combinação de estruturas do tipo cadeia e hierárquica. É a mais comum em sistemas TG de classificação e codificação de peças.

O número de dígitos no código pode variar entre 6 e 30. Esquemas de codificação que contêm apenas dados do projeto exigem menos dígitos, talvez 12 ou menos. A maioria dos sistemas de codificação e classificação modernos incluem dados do projeto e da manufatura, o que normalmente exige de 20 a 30 dígitos. Pode parecer demais para um leitor humano, mas a maior parte do processamento de dados dos códigos é realizada por computadores, para os quais um grande número de dígitos é uma questão de menor importância.

**Tabela 18.1 Atributos do projeto e da manufatura normalmente incluídos em um sistema de classificação e codificação em tecnologia de grupo**

Atributos do projeto da peça	Atributos da manufatura da peça
Formato externo básico	Principais processos
Formato interno básico	Operações de menor importância
Formato rotacional ou prismático	Sequência da operação
Razão entre comprimento e diâmetro (peças rotacionais)	Dimensão maior
Razão de relação (peças prismáticas)	Acabamento superficial
Tipos de materiais	Máquina-ferramenta
Função da peça	Tempo do ciclo de produção
Dimensões maiores	Tamanho do lote
Dimensões menores	Produção anual
Tolerâncias	Dispositivos necessários
Acabamento superficial	Ferramentas de corte utilizadas na manufatura

### 18.2.2 O sistema Opitz de classificação e codificação de peças

O sistema Opitz é interessante porque foi um dos primeiros esquemas de classificação e codificação publica-

dos para peças mecânicas [29] (Nota histórica 18.1) e ainda é amplamente utilizado. Foi desenvolvido por H. Opitz, da Universidade de Aachen, na Alemanha, e representa um dos esforços pioneiros na tecnologia de grupo. Dirigido por peças usinadas, é o mais conhecido, se não o

mais utilizado, dos sistemas de codificação e classificação de peças. O esquema de codificação Opitz utiliza a seguinte sequência de dígitos:

12345 6789 ABCD

O código básico consiste de nove dígitos, os quais podem ser ampliados acrescentando quatro dígitos. Os primeiros nove têm a intenção de transmitir dados do projeto e da manufatura. A interpretação deles é definida na Figura 18.5. Os primeiros cinco dígitos, 12345, são chamados de *código de forma*. Isso descreve os atributos de projeto fundamentais da peça, como formato externo (por exemplo, rotacional *versus* prismático) e características usinadas (por exemplo, furos, roscas, dentes de engrenagem, e assim por diante). Os quatro dígitos seguintes, 6789, constituem o *código suplementar*, que inclui alguns dos atributos úteis na manufatura (por exemplo, dimensões, material de trabalho, formato de partida e precisão). Os quatro dígitos extras, ABCD, são referidos como o *código secundário* e são usados para identificar o tipo de operação e sequência de produção. O código secundário pode ser projetado pela empresa usuária para servir às próprias necessidades.

O sistema de codificação completo é complexo demais para proporcionar uma descrição compreensiva aqui — Opitz escreveu um livro inteiro sobre o sistema [29]. Entretanto, para dar uma ideia de como funciona, examinaremos o modelo do código consistindo dos pri-

meiros cinco dígitos, definidos de maneira geral na Figura 18.5. O primeiro dígito identifica se a peça é rotacional ou prismática (não rotacional). Ele também descreve o formato geral e as proporções da peça. Limitamos a pesquisa aqui a peças rotacionais que não possuem quaisquer características fora do comum, aquelas com valores de primeiro dígito de 0, 1 ou 2. Para essa classe de peças, a codificação dos primeiros cinco dígitos é definida na Figura 18.6. Considere o exemplo a seguir para demonstrar a codificação de determinada peça.

**EXEMPLO 18.1**

**Sistema Opitz de codificação de peças**

Levando-se em consideração o projeto de peças rotacional na Figura 18.7, determine o modelo de código no sistema Opitz de classificação e codificação de peças.

**Solução:** Com referência à Figura 18.6, o código de cinco dígitos é desenvolvido da seguinte maneira:

- Razão entre comprimento e diâmetro, C/D = 1,5 ..... Dígito 1 = 1
  - Formato externo: escalonada em ambas as extremidades com rosca em uma extremidade ..... Dígito 2 = 5
  - Formato interno: peça contém um furo passante ..... Dígito 3 = 1
  - Usinagem de superfície plana: nenhuma .... Dígito 4 = 0
  - Furos auxiliares, engrenagem de dentes etc.: nenhum ..... Dígito 5 = 0
- O modelo do código no sistema Opitz é 15100.

Figura 18.5 Estrutura básica do sistema Opitz de classificação e codificação de peças

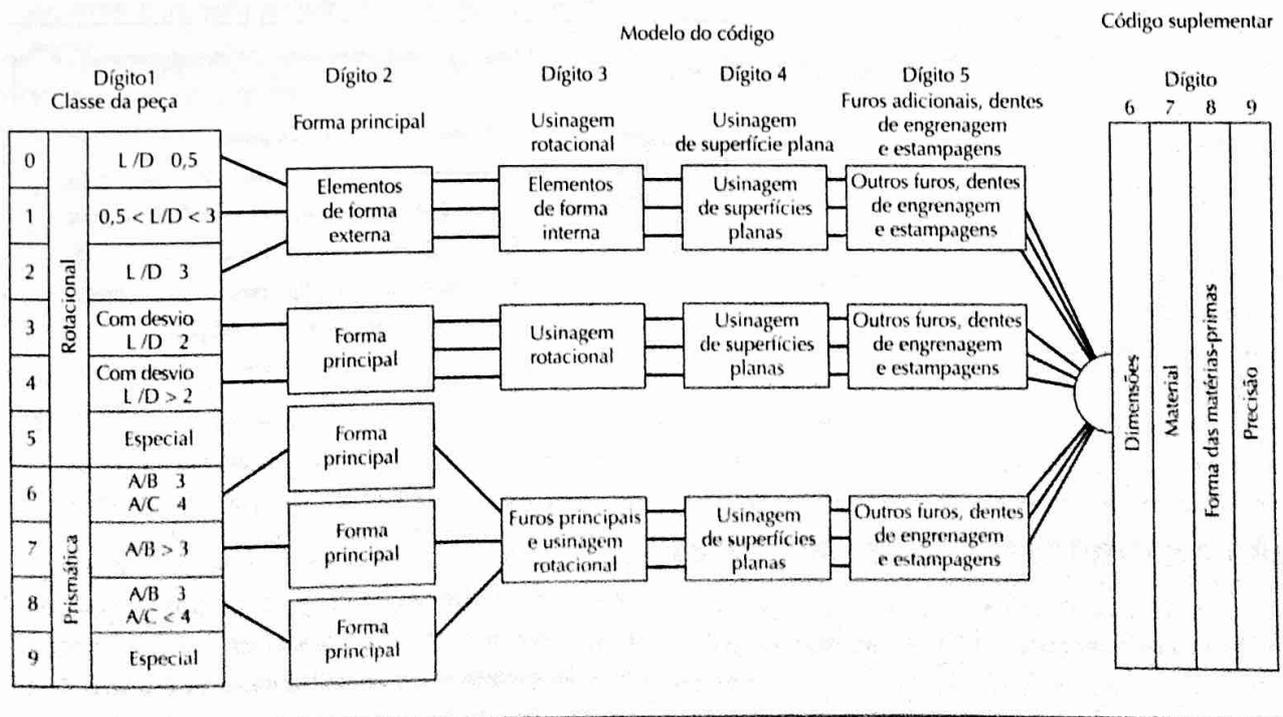
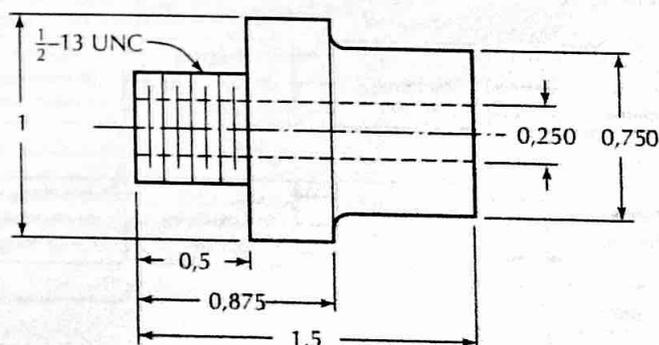


Figura 18.6 Modelo do código (dígitos 1 a 5) para peças rotacionais no sistema Opitz de codificação. O primeiro dígito do código é limitado a valores de 0, 1 ou 2

Dígito 1		Dígito 2		Dígito 3		Dígito 4		Dígito 5	
Classe da peça		Formato externo, elementos de forma externa		Formato interno, elementos de forma interna		Usinagem de superfície plana		Furos auxiliares e dentes da engrenagem	
0 Peças rotacionais	L/D 0,5	0 Lisa, sem elementos de forma		0 Nenhum furo, nenhuma penetração		0 Sem usinagem de superfície		0 Sem furos auxiliares	
	1 0,5 < L/D < 3	1 Nenhum elemento de forma		1 Nenhum elemento de forma		1 Superfície plana e/ou curva em uma direção, externa		1 Furos axiais sem padrão	
		2 Rosca		2 Rosca		2 Superfície plana externa relacionada pela graduação em torno do círculo		2 Furos axiais com padrão	
	2 L/D 3	3 Escalonada em uma extremidade ou lisa		3 Lisa ou escalonada em uma extremidade		3 Entalhe externo e/ou ranhura		3 Furos radiais sem padrão	
	3 Peças prismáticas	4 Nenhum elemento de forma		4 Nenhum elemento de forma		4 Chaveta externa (poligonal)		4 Furos axiais e/ou radiais em qualquer direção	
		5 Rosca		5 Rosca		5 Superfície plana externa e/ou fenda, chaveta externa		5 Furos axiais e/ou radiais com padrões em qualquer direção	
6 Entalhe funcional		6 Entalhe funcional		6 Superfície plana interna e/ou ranhura		6 Engrenagem de dentes retos			
4 Peças prismáticas	7 Cone funcional		7 Cone funcional		7 Chaveta interna (poligonal)		7 Engrenagem cônica		
	8 Rosca operacional		8 Rosca operacional		8 Polígono interno e externo, entalhe e/ou ranhura		8 Outros tipos de engrenagens		
	9 Todos outros		9 Todos outros		9 Todos outros		9 Com dentes de engrenagem 9 Todos outros		

Figura 18.7 Projeto da peça para o Exemplo 18.1



### 18.3 ANÁLISE DO FLUXO DE PRODUÇÃO

A análise do fluxo de produção (AFP; do inglês, *production flow analysis* — PFA) é uma abordagem para a identificação de famílias de peças e a formação de células desenvolvida pioneiramente por J. Burbidge [7], [8], [9]. Trata-se de um método que utiliza as informa-

ções contidas em planilhas de rotas de produção em vez de desenhos de peças. As peças com roteamentos idênticos ou similares são classificadas em famílias de peças, as quais podem então ser utilizadas para formar células de máquinas lógicas em um *layout* de tecnologia de grupo. Já que a AFP utiliza dados de manufatura em vez de

Tabela 18.2 Números de códigos possíveis indicando operações e/ou máquinas para ordenação na análise do fluxo de produção (altamente simplificado)

Operação ou máquina	Código
Corte	01
Torno mecânico	02
Torno semiautomático	03
Fresamento	04
Furação manual	05
Furadeira NC	06
Retífica	07

dados de projeto para identificar famílias de peças, ela pode superar duas anomalias possíveis de ocorrer na classificação e codificação de peças. Primeiro, peças cuja geometria básica é bastante diferente podem, apesar disso, exigir roteamentos de processo similares ou mesmo idênticos. Segundo, peças cujas geometrias são bastante similares podem exigir roteamentos de processo diferentes.

O procedimento na análise do fluxo de produção tem de começar com a definição do alcance do estudo, o que significa decidir sobre a população de peças a ser analisada. Devemos incluir todas as peças na fábrica no estudo ou uma amostra representativa deve ser escolhida para a análise? Uma vez que a decisão tenha sido tomada, então o procedimento na AFP consiste dos passos a seguir:

1. *Coleta de dados.* Os dados mínimos necessários na análise são o número da peça e a sequência de operação, que estão contidos em documentos de fábrica chamados de folhas de rota, folhas de processo, planilhas de operação ou algum nome similar. Cada operação é normalmente associada a uma máquina em particular e, dessa maneira, determinar a sequência das operações define a sequência das máquinas.
2. *Ordenação dos roteamentos do processo.* Nesse passo, as peças são arranjadas em grupos de acordo com a similaridade de seus roteamentos do processo. Para facilitar esse passo, todas as operações ou máquinas incluídas na fábrica são reduzidas a números de código, como aqueles mostrados na Tabela 18.2. Para cada peça, os códigos de operação são listados na ordem em que são realizados. Um procedimento de ordenação é então utilizado para arrancar as peças em 'pacotes', que são grupos de peças com roteamentos idênticos.

Alguns pacotes podem ter apenas um número de peça, indicando a singularidade do processamento daquela peça. Outros vão conter muitas peças, as quais constituirão uma família de peças.

3. *Diagrama AFP.* Os processos utilizados para cada pacote são então exibidos em um diagrama AFP, um exemplo do qual é ilustrado na Tabela 18.3.<sup>1</sup> O diagrama é uma tabulação do processo ou números de códigos de máquinas para todos os pacotes de peças. Em literatura de TG recente [28], o diagrama AFP foi referido pelo termo *matriz de incidência de peça-máquina* ou simplesmente *matriz peça-máquina*. Nessa matriz, as entradas têm um valor  $x_{ij}$  igual a 1 ou 0;  $x_{ij}$  igual a 1 indica que a peça correspondente  $i$  exige processamento na máquina  $j$ , e  $x_{ij}$  igual a 0 indica que nenhum processamento do componente  $i$  é realizado na máquina  $j$ . Muitas vezes, para deixar a questão mais clara ao apresentar a matriz, os zeros são indicados como entradas em branco (vazias), como na tabela.
4. *Análise de agrupamento.* Do padrão de dados no diagrama AFP, agrupamentos relacionados são identificados e rearranjados em um novo padrão que reúne pacotes com sequências de máquina similares. Um rearranjo possível do diagrama de AFP original é mostrado na Tabela 18.4, em que diferentes agrupamentos de máquinas são indicados dentro de blocos, os quais podem ser considerados possíveis células. É comum o caso (mas não na Tabela 18.4) de alguns pacotes não

<sup>1</sup> Para esclarecer a questão, em matrizes de incidência de peça-máquina e discussão relacionada, identificamos as peças por caracteres alfabéticos e as máquinas por números. Na prática, números seriam utilizados por ambos.

Tabela 18.3 Diagrama AFP, também conhecido como matriz peça-máquina

Máquinas ( <i>j</i> )	Peças ( <i>i</i> )									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1			1				1		1
2					1					1
3			1		1					
4		1				1				
5	1							1		
6			1							1
7		1				1	1			

Tabela 18.4 Diagrama de AFP rearranjado, indicando possíveis agrupamentos de máquinas

Máquinas ( <i>j</i> )	Peças ( <i>i</i> )									
	C	E	I	A	D	H	F	G	B	
3	1	1	1							
2		1	1							
6	1		1							
1				1	1	1				
5				1		1				
7							1	1	1	
4							1		1	

se encaixarem em agrupamentos lógicos. Essas peças são analisadas para ver se uma sequência de processo revisada pode ser desenvolvida para que se encaixe em um dos grupos. Se não, essas peças têm de continuar a ser fabricadas por meio de um *layout* de processo convencional. Na Seção 18.6.1, examinamos uma técnica sistemática chamada de *ordem de classificação de agrupamento*, que pode ser utilizada para realizar uma análise de agrupamento.

O ponto fraco da análise do fluxo de produção é que os dados utilizados na técnica são derivados de planilhas de rotas de produção existentes. Muito provavelmente, essas planilhas foram preparadas por diferentes planejadores de processos e os roteamentos podem conter operações que não são otimizadas, são ilógicas ou desnecessárias. Conseqüentemente, os agrupamentos de máquinas finais obtidos na análise podem ser subotimizados. Apesar desse ponto fraco, a AFP tem a virtude de exigir menos tempo do que um procedimento completo de classificação e codificação de peças. Isso é atrativo para muitas empresas que querem introduzir a tecnologia de grupo em suas operações industriais.

## 18.4 MANUFATURA CELULAR

Desconsiderando se as famílias de peças foram determinadas por inspeção visual, classificação e codificação de peças ou análise do fluxo de produção, há uma vantagem em produzi-las utilizando células de manufatura TG em vez de um *layout* tradicional por processos. Quando as máquinas são agrupadas, é utilizado para descrever essa organização de trabalho o termo *manufatura celular*, uma aplicação da tecnologia de grupo na qual máquinas ou processos dissimilares foram agregados em células, cada uma dedicada à produção de uma peça, família de produtos ou grupo limitado de famílias. Os objetivos típicos na manufatura celular são similares àqueles da tecnologia de grupo:

- *Encurtar os tempos de processamento* reduzindo os tempos de preparação, de manuseio de peças, de espera e os tamanhos dos lotes.
- *Reduzir o estoque de itens em andamento*. Tamanhos de lotes menores e tempos de processamento mais curtos reduzem o trabalho em andamento.

- *Para melhorar a qualidade* permite-se que cada célula se especialize na produção de um número menor de peças diferentes, o que reduz a variabilidade de processos.
- *Para simplificar a programação de produção.* A similaridade entre as peças na família reduz a complexidade da programação de produção. Em vez de programar peças por uma sequência de máquinas em um *layout* por processos, o sistema simplesmente programa as peças por meio da célula.
- *Para reduzir tempos de preparação* utilizam-se *ferramentas de grupo* (ferramentas de corte, dispositivos e ferragens) projetadas para processar a família de peças, em vez de ferramental projetado para uma peça individual. Isso reduz o número de ferramentas individuais exigidas assim como o tempo para mudar as ferramentas entre peças.

Nesta seção, consideramos vários aspectos da manufatura celular: (1) o conceito de peças compostas e (2) projeto de células.

### 18.4.1 Conceito de peça composta

Famílias de peças são definidas pelo fato de que seus membros têm características similares de projeto e/ou manufatura. O conceito de peça composta leva essa definição de família de peças para sua conclusão lógica. A *peça composta* para uma determinada família é uma peça hipotética que inclui todos os atributos de projeto e manufatura

da família. Em geral, uma peça individual na família terá algumas das características da família, não todas.

Há correlação entre características de projeto de uma peça e as operações de produção necessárias para gerar aquelas características. Furos redondos são feitos com furação, formatos cilíndricos são feitos geralmente com torneamento, superfícies planas, com fresamento e assim por diante. Uma célula de produção projetada para a família de peças deve incluir essas máquinas, necessárias para fazer a peça composta. Uma célula dessa natureza seria capaz de produzir qualquer membro da família, simplesmente omitindo aquelas operações que correspondem a características não possuídas pela peça em particular. A célula seria projetada para permitir variações em tamanho dentro da família assim como variações de características.

Para ilustrar, considere a peça composta na Figura 18.8(a). Ela representa uma família de peças rotacionais com características definidas na parte (b) da figura. Associada com cada característica está uma determinada operação de usinagem, como resumido pela Tabela 18.5. Para produzir essa família de peças, uma célula seria projetada com a capacidade de realizar as sete operações necessárias para a produção da peça composta (a última coluna na Tabela 18.5). Para produzir um membro específico da família, operações seriam incluídas para fabricar as características necessárias da peça. Para peças sem todas as características, operações desnecessárias simplesmente seriam omitidas. Máquinas, dispositivos e ferramentas seriam organizados em prol de um fluxo eficiente de peças pela célula.

Figura 18.8 Conceito de peça composta: (a) a peça composta para uma família de peças rotacionais usinadas e (b) as características individuais da peça composta. Ver Tabela 18.5 com as características individuais e operações de manufatura correspondentes

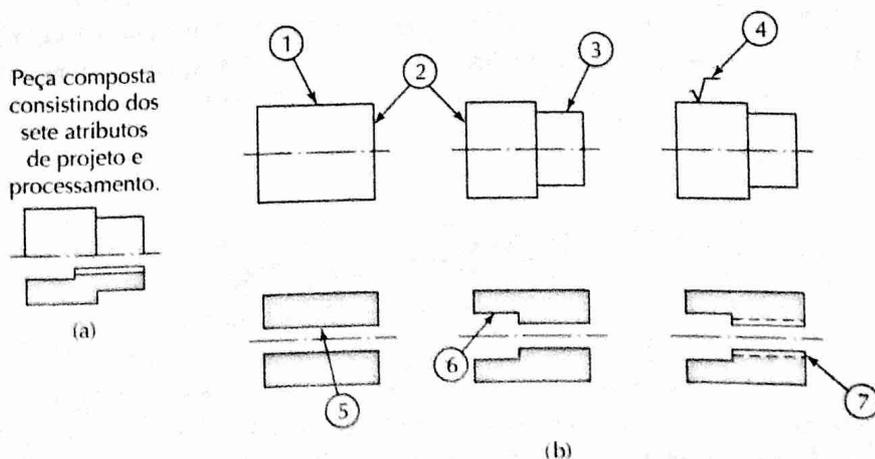


Tabela 18.5 Características de projeto da peça composta na Figura 18.8 e as operações de manufatura necessárias para obtê-las

Rótulo	Característica de projeto	Operação de manufatura correspondente
1	Cilindro externo	Torneamento
2	Face de cilindro	Faceamento
3	Degrau cilíndrico	Torneamento
4	Superfície lisa	Retífica cilíndrica externa
5	Furo axial	Furação
6	Escareado	Escareamento
7	Roscas internas	Rosqueamento

Na prática, o número de atributos de projeto e manufatura é maior do que sete, e concessões têm de ser feitas para variações no tamanho e no formato das peças na família. Além disso, o conceito de peça composta é útil para visualizar o problema de projeto de células.

### 18.4.2 Projeto de célula de manufatura

O projeto da célula é crítico na manufatura celular. O projeto da célula determina até um grau muito alto o desempenho da célula. Nesta seção, discutimos tipos de células, *layouts* de células e o conceito de máquina-chave.

**Tipos de células e layouts.** Células de manufatura de TG podem ser classificadas de acordo com o número de máquinas e o grau de mecanização para o fluxo de material entre as máquinas. Identificamos a seguir quatro configurações de célula de TG:

1. Célula de máquina individual.
2. Célula de máquinas em grupo com manuseio manual.

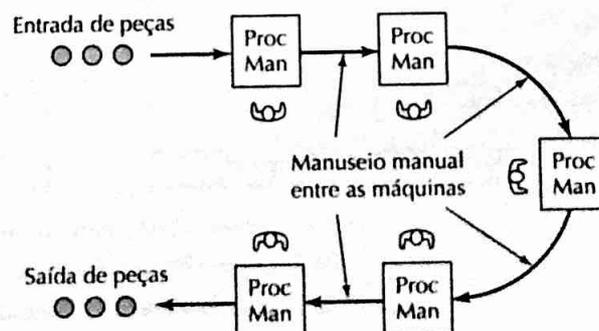
3. Célula de máquinas em grupo com manuseio semi-integrado

4. Célula de manufatura flexível ou sistema de manufatura flexível.

Como o nome indica, a *célula de máquina individual* consiste de uma máquina mais os dispositivos e as ferramentas. Pode ser aplicada a peças cujos atributos permitem que sejam feitas em um tipo básico de processo, como torneamento ou fresamento. Por exemplo, a peça composta da Figura 18.8 poderia ser feita em um torno semiautomático com a possível exceção da operação de retífica cilíndrica (passo 4).

A *célula de máquinas em grupo com manuseio manual* é um arranjo de mais de uma máquina utilizada coletivamente para produzir uma ou mais famílias de peças. Não há uma provisão para o movimento mecanizado de peças entre as máquinas na célula. Em vez disso, os operadores humanos da célula realizam a função de manuseio de materiais. Normalmente a célula é organizada em um *layout* em formato de U, como mostrado na Figura

Figura 18.9 Célula de máquina com manuseio manual entre máquinas. Um *layout* de máquina em formato de U é mostrado



Legenda: Proc = operação de processamento como fresar, torner etc., Man = operação manual; setas indicam o fluxo de trabalho

18.9, que é considerado apropriado quando há uma variação no fluxo de trabalho entre as peças produzidas na célula. Ele também permite que os trabalhadores multifuncionais na célula se desloquem com facilidade entre as máquinas [27]. Outras vantagens das células em formato de U nas aplicações de montagem de modelo em lotes, comparadas a uma linha de montagem de ritmo convencional, incluem: (1) troca mais fácil de um modelo para o próximo, (2) qualidade melhorada, (3) controle visual de trabalho em andamento, (4) investimento inicial mais baixo porque as células são mais simples e nenhum transportador motorizado é exigido, (5) maior satisfação dos trabalhadores devido à ampliação do trabalho e ausência de imposição de um ritmo e (6) mais flexibilidade para se ajustar a uma demanda maior ao acrescentar mais células [14].

A célula de máquinas em grupo com manuseio manual é algumas vezes realizada em um *layout* convencional por processos sem rearranjar o equipamento, o que é feito designando determinadas máquinas para o grupo de máquinas e restringindo seu trabalho a famílias de peças específicas. Isso permite que muitos dos benefícios da manufatura celular sejam conseguidos sem o gasto de rearranjar o equipamento na fábrica. Obviamente, os benefícios de manuseio de materiais do TG são minimizados com essa organização.

A célula de máquinas em grupo com manuseio semi-integrado utiliza um sistema de manuseio mecanizado, como um transportador, para deslocar peças entre as máquinas na célula. O sistema de manufatura flexível (do inglês, *flexible manufacturing system* — FMS) combina um sistema de manuseio de materiais completamente integrado a estações de processamento automatizadas. O FMS é o sistema mais automatizado de células em tecnologia de grupo (Capítulo 19).

Vários *layouts* são utilizados em células TG. O formato em U na Figura 18.9 é uma configuração popular na manufatura celular. Outros *layouts* de TG incluem em linha, circular (*loop*) e retangular, mostrados na Figura 18.10 para o caso do manuseio semi-integrado.

Determinar o *layout* mais apropriado depende dos roteamentos das peças produzidas na célula. Quatro tipos de movimento de peças podem ser distinguidos em um sistema de produção de peças de modelo misto. Eles são ilustrados na Figura 18.11 e definidos a seguir, com a direção de avanço do fluxo de trabalho da esquerda para a direita na figura: (1) *repetir operação*, em uma operação consecutiva é realizada na mesma máquina, de maneira que, na verdade, a peça não se desloca; (2) *movimento em sequência*, no qual a peça se desloca da máquina atual para uma vizinha imediata à frente; (3)

*movimento de desvio*, no qual a peça se desloca da máquina atual para outra máquina que está duas ou mais máquinas à frente e (4) *movimento de retrocesso*, no qual a peça se desloca da máquina atual para uma máquina anterior.

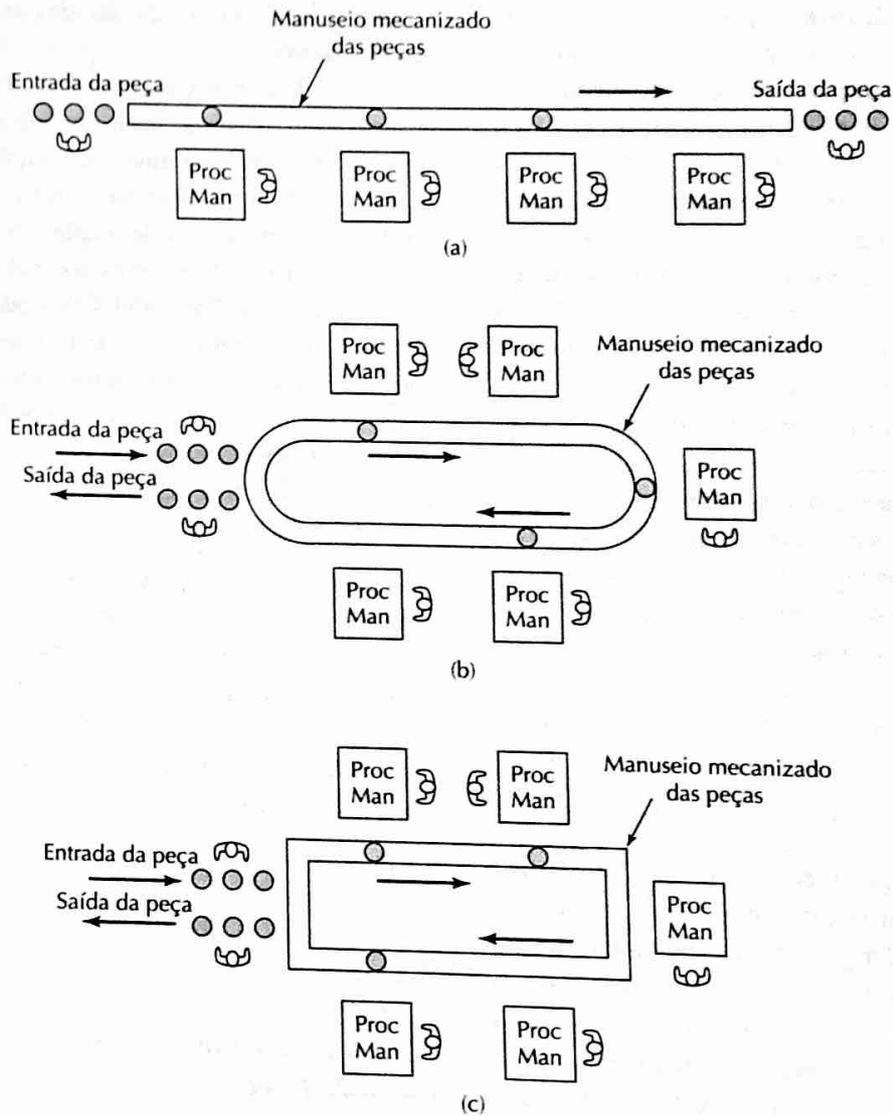
Quando a aplicação consiste exclusivamente de movimentos em sequência, então um *layout* em linha é apropriado. Um *layout* em formato de U também funciona bem e tem a vantagem de uma maior interação entre os trabalhadores na célula. Quando a aplicação inclui operações repetidas, então múltiplas estações (máquinas) são muitas vezes necessárias. Para células exigindo movimentos de desvio, o *layout* em formato de U é apropriado. Quando movimentos de retrocesso são necessários, um *layout* circular ou retangular permite a recirculação de peças dentro da célula. Fatores adicionais que têm de ser acomodados pelo projeto da célula incluem:

- *Quantidade de trabalho a ser realizado pela célula.* Inclui o número de peças por ano e o tempo de processamento (ou montagem) por peça em cada estação. Esses fatores determinam a carga de trabalho que tem de ser realizada pela célula e, portanto, o número de máquinas que têm de ser incluídas, assim como o custo total de operação da célula e o investimento que tem de ser justificado.
- *Tamanho da peça, formato, peso e outros atributos físicos.* Determinam o tamanho e o tipo de equipamento de manuseio de material e de processamento que tem de ser usado.

**Conceito de máquina-chave.** De certa maneira, uma célula TG opera como uma linha de montagem manual e é desejável dividir a carga de trabalho igualmente entre as máquinas na célula. De outro lado, geralmente há determinada máquina em uma célula (ou talvez mais de uma máquina em uma célula grande) cuja operação é mais cara em relação a outras máquinas ou que realiza operações críticas na planta. Essa máquina recebe o nome de *máquina-chave*. É importante que sua utilização seja alta, mesmo que isso signifique que as outras máquinas na célula tenham, relativamente, baixas utilizações. As outras são referidas como *máquinas de apoio* e devem ser organizadas na célula para manter a máquina-chave ocupada. De certa maneira, a célula é projetada para que a máquina-chave torne-se o gargalo no sistema.

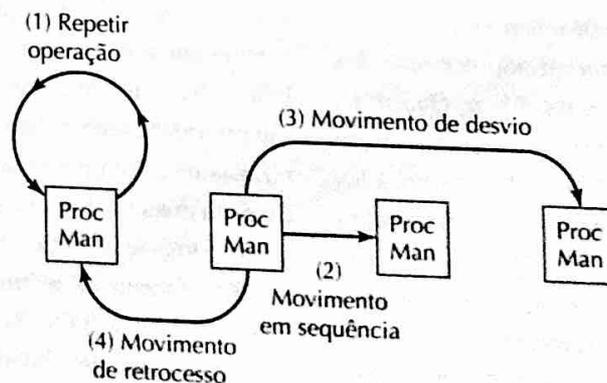
O conceito de máquina-chave é às vezes utilizado para planejar a célula TG. A abordagem é decidir quais peças devem ser processadas pela máquina-chave e então determinar quais máquinas de apoio são necessárias para completar o processamento dessas peças.

Figura 18.10 Células de máquinas com manuseio semi-integrado: (a) layout em linha, (b) layout circular e (c) layout retangular



Legenda: Proc = operação de processamento, como fresar, tornear etc., Man = operação manual; setas indicam fluxo de trabalho

Figura 18.11 Quatro tipos de movimentos de peças em um sistema de produção de modelo misto. O avanço do fluxo de trabalho é da esquerda para a direita



Há geralmente duas medidas de utilização de interesse em uma célula TG: a utilização da máquina-chave e a utilização da célula como um todo. A utilização da máquina-chave pode ser medida usando a definição usual (Seção 3.1.3); já a de cada uma das outras máquinas pode ser avaliada similarmente. A utilização da célula é obtida por meio de uma simples média aritmética de todas as máquinas da célula. (Um dos problemas de exercício no fim do capítulo ilustra o conceito de máquina-chave e a determinação de utilização.)

## 18.5 Aplicações da tecnologia de grupo

Na introdução do capítulo, definimos a tecnologia de grupo como uma 'filosofia de manufatura'. A TG não é uma técnica particular, embora várias ferramentas e técnicas, como classificação e codificação de peças e análise do fluxo de produção, tenham sido desenvolvidas para implementá-la. A filosofia da tecnologia de grupo pode ser aplicada em um número de áreas. Nossa discussão concentra-se nas duas principais áreas de manufatura e projeto do produto.

**Aplicações de manufatura.** A aplicação mais comum de TG é na manufatura, e a aplicação mais comum na manufatura envolve a formação de células de um tipo ou de outro. Nem todas as empresas rearranjam máquinas para formar células. Há três maneiras nas quais os princípios de tecnologia de grupo podem ser aplicadas em manufatura [21]:

1. *Programação e roteamento informal de peças similares por máquinas selecionadas.* Essa abordagem obtém vantagens na preparação de máquinas, mas não há uma definição formal de famílias de peças e não ocorre um rearranjo físico de equipamento.
2. *Células virtuais de máquinas.* Essa abordagem envolve a criação de famílias de peças e dedicação do equipamento à sua manufatura, mas sem o rearranjo físico das máquinas em células. As máquinas na célula virtual permanecem em suas posições originais na fábrica. O uso de células virtuais parece facilitar o compartilhamento das máquinas com outras células virtuais produzindo outras famílias de peças [23].
3. *Células formais de máquinas.* Essa é a abordagem convencional de TG na qual um grupo de máquinas dissimilares são fisicamente reposicionadas em uma célula dedicada à produção de uma ou um conjunto limitado de famílias de peças (Seção 18.4.2). As máquinas em uma célula formal são posicionadas proximalmente umas das outras a fim de minimizar o manuseio de peças, o tempo de transferência e o trabalho em andamento.

Outras aplicações de TG na manufatura incluem planejamento de processo, famílias de peças e programas de peças de controle numérico. O planejamento de processo de peças novas pode ser facilitado identificando famílias de peças. A nova peça é associada a uma família existente e a geração do plano de processo para a nova peça segue o roteamento dos outros membros da família de peças. Isso é feito de maneira formalizada por meio do uso da classificação e codificação de peças. Essa abordagem é discutida no contexto do planejamento de processo automatizado.

Idealmente, todos os membros da mesma família de peças exigem preparações, ferramentas e dispositivos similares, o que em geral resulta em redução no montante de ferramentas e dispositivos necessários. Em vez de utilizar um *kit* de ferramentas especial para cada peça, um sistema de TG utiliza um *kit* de ferramentas desenvolvido para cada família de peças. Pode-se explorar seguidamente o conceito de *dispositivo de fixação modular*, no qual um dispositivo de base comum pode acomodar adaptações para rapidamente trocar entre diferentes peças na família.

Uma abordagem similar pode ser aplicada à programação de peças NC (do inglês, *numerical control*). A *programação paramétrica* [26] envolve a preparação de um programa NC comum que cubra toda a família de peças. O programa é então adaptado para membros individuais da família, inserindo dimensões e outros parâmetros aplicáveis à peça em particular. A programação paramétrica reduz tanto o tempo de programação como o de configuração.

**Aplicações do projeto de produto.** A aplicação da tecnologia de grupo ao projeto de produto ocorre principalmente em sistemas de recuperação de projetos que reduzem a proliferação de peças. Estima-se que o custo de lançar o novo projeto de uma peça varia entre \$ 2 mil e \$ 12 mil [33]. Em uma pesquisa da indústria divulgada em Wemmerlov e Myer [32], concluiu-se que em torno de 20 por cento de situações de peças novas, um projeto de peça existente poderia ter sido usado. Em aproximadamente 40 por cento dos casos, um projeto de peça existente poderia ter sido usado com modificações. Os casos restantes exigiriam novos projetos de peças. Se a economia de custo para uma empresa gerando mil novos projetos de peças por ano fosse de 75 por cento quando um projeto de peça existente poderia ser usado (presumindo que ainda haveria algum custo de tempo associado à peça nova para análise de engenharia e recuperação de projeto) e 50 por cento quando um projeto existente poderia ser modificado, então a economia anual total para a empresa seria de \$ 700 mil a \$ 4,2 milhões, ou 35 por cento do gasto de projeto total da empresa devido a lançamentos de peças. O nível de econo-

mias de projeto descrito aqui exige um procedimento de recuperação de projetos eficiente. A maioria dos procedimentos de recuperação de projetos é baseada em sistemas de classificação e codificação de peças (Seção 18.2).

Outras aplicações de projeto da tecnologia de grupo envolvem simplificação e padronização de parâmetros de projeto como tolerâncias, raios nos cantos internos, tamanhos de chanfros em cantos externos, tamanhos de furos, tamanhos de roscas etc. Essas medidas simplificam os procedimentos de projeto e reduzem a proliferação de peças. A padronização de projetos também rende dividendos na manufatura reduzindo o número exigido de raios distintos em pontas de ferramentas de tornos, tamanhos de brocas e de mandris porta-ferramentas. Há também o benefício da redução do montante de dados e informações que a empresa tem de lidar. Menos projetos de peças, atributos de projetos, ferramentas, mandris, e assim por diante, significa menos e mais simples documentos de projetos, planos de processo e outros registros de dados.

## 18.6 Análise quantitativa na manufatura celular

Muitas técnicas quantitativas foram desenvolvidas para lidar com problemas em tecnologia de grupo e manufatura celular. Nesta seção, consideramos duas áreas-problema: (1) agrupar peças e máquinas em famílias e (2) dispor as máquinas em uma célula TG. A primeira foi e segue sendo uma área de pesquisa ativa, e várias das publicações de pesquisa mais significativas estão listadas nas referências [2], [3], [12], [13], [24], [25]. A técnica que descrevemos para solucionar o problema de agrupar peças e máquinas na seção atual é a de agrupamento por ordem de classificação (do inglês, *rank order clustering* — ROC) [24]. A segunda área-problema também foi assunto de pesquisa, e vários estudos também estão listados nas referências [1], [7], [9], [19]. Na Seção 18.6.2, descrevemos a abordagem heurística introduzida por Hollier [19].

### 18.6.1 Agrupando peças e máquinas por ordem de classificação

O problema abordado aqui é determinar como máquinas em uma planta existente deveriam ser agrupadas em células. O problema é o mesmo se as células são virtuais ou formais (Seção 18.5). Trata-se basicamente do problema de identificar famílias de peças. Após a identificação das famílias de peças, as máquinas para produção podem ser escolhidas e agrupadas. Como já vimos, os três métodos básicos para identificar famílias de peças são: (1)

inspeção visual, (2) classificação e codificação de peças e (3) análise do fluxo de produção.

A técnica de agrupamento por ordem de classificação (ROC), primeiro proposta por King [24], é especificamente aplicável à análise do fluxo de produção. Trata-se de um algoritmo eficiente e fácil de usar para agrupar máquinas em células. Em uma matriz peça-máquina de partida que pode ser compilada para documentar os roteamentos da peça em uma oficina de máquinas (ou outra oficina de trabalho), as posições ocupadas são organizadas de maneira aparentemente aleatória. O agrupamento por ordem de classificação funciona por reduzir a matriz peça-máquina a um conjunto de blocos em diagonal que representam famílias de peças e grupos de máquinas associadas. Começando com a matriz peça-máquina inicial, o algoritmo consiste dos passos a seguir:

1. Em cada linha da matriz, ler as séries de 1s e 0s (entradas em branco = 0s) da esquerda para direita como número binário. Classificar as linhas em ordem de valor decrescente. No caso de um empate, classificar as linhas na mesma ordem em que aparecem na matriz atual.
2. Numerando de cima para baixo, a ordem atual das linhas é a mesma determinada no passo anterior? Se sim, vá para o passo 7. Se não, siga para o passo seguinte.
3. Reordene as linhas na matriz peça-máquina listando-as em ordem de classificação decrescente, partindo do topo.
4. Em cada coluna da matriz, ler a série de 1s e 0s (entradas em branco = 0s) de cima para baixo com um número binário. Classifique as colunas em ordem de valor decrescente. No caso de empate, classifique as colunas na mesma ordem em que aparecem na matriz corrente.
5. Numerando da esquerda para direita, a ordem atual das colunas é a mesma determinada no passo anterior? Se sim, vá para o passo 7. Se não, vá para o passo seguinte.
6. Reordene as colunas na matriz peça-máquina listando-as na ordem de classificação decrescente, começando com a coluna da esquerda. Vá para o passo 1.
7. Pare.

Para leitores desacostumados a avaliar números binários nos passos 1 e 4, pode ser interessante converter cada valor binário ao equivalente decimal. Por exemplo, as entradas na primeira linha da matriz na Tabela 18.3 são lidas como 100100010. A conversão para o seu equivalente decimal seria:  $(1 \times 2^8) + (0 \times 2^7) + (0 \times 2^6) + (1 \times 2^5) + (0 \times 2^4) + (0 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (0 \times 2^0) = 256 + 32 + 2 = 290$ . A conversão decimal torna-se pouco prática para o grande número de peças encontrados na realidade, de maneira que é preferível comparar os números binários.

**EXEMPLO 18.2**

**Técnica de agrupamento por ordem de classificação (ROC)**

Aplicar a técnica de agrupamento por ordem de classificação para a matriz peça-máquina na Tabela 18.3.

**Solução:** O passo 1 consiste da leitura das séries de 1s e 0s em cada linha como números binários. Na Tabela 18.6(a), convertemos o valor binário de cada linha ao decimal equivalente. Os valores são então colocados em suas ordens de classificação na coluna mais à direita. No passo 2, vemos que a ordem das linhas é diferente da matriz de partida. Portanto, reordenamos as linhas no passo 3. No passo 4, lemos a série de 1s e 0s em cada coluna de cima para baixo como números binários (mais uma vez convertemos ao equivalente decimal) e classificamos as colunas em ordem de valor decrescente, como mostrado na Tabela 18.6(b). No passo 5, vemos que a ordem das colunas é diferente da matriz anterior. Procedendo do passo 6 de volta aos passos 1 e 2, vemos que

um reordenamento de colunas faz com que a ordem das linhas fique com os valores descendentes e o algoritmo é concluído (passo 7). A solução final é mostrada na Tabela 18.6(c). Uma comparação próxima dessa solução com a Tabela 18.4 revela que elas são os mesmos agrupamentos de peça-máquina.

No problema do exemplo, foi possível dividir as peças e máquinas em três grupos de peça-máquina mutuamente exclusivos. Seria o caso ideal porque as famílias de peças e células de máquinas associadas são completamente separadas. Entretanto, não é incomum que exista uma sobreposição de requisitos de processamento entre grupos de máquinas, isto é, um determinado tipo de peça precisa ser processado por mais de um grupo de máquinas. Uma maneira de lidar com a sobreposição é simplesmente duplicar a máquina que é usada por mais do que uma família de peças, colocando o mesmo tipo de máquina em ambas

**Tabela 18.6(a) Primeira iteração (passo 1) na técnica ROC aplicada ao Exemplo 18.2**

Valores binários	2 <sup>8</sup>	2 <sup>7</sup>	2 <sup>6</sup>	2 <sup>5</sup>	2 <sup>4</sup>	2 <sup>3</sup>	2 <sup>2</sup>	2 <sup>1</sup>	2 <sup>0</sup>	Equivalente decimal	Classificação
	Peças										
Máquinas	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
1	1			1				1		290	1
2					1				1	17	7
3			1		1				1	81	5
4		1				1				136	4
5	1							1		258	2
6			1						1	65	6
7		1				1	1			140	3

**Tabela 18.6(b) Segunda iteração (passos 3 e 4) na técnica ROC aplicada ao Exemplo 18.2**

Máquinas	Peças									Valores binários
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	1			1				1		2 <sup>6</sup>
5	1							1		2 <sup>5</sup>
7		1				1	1			2 <sup>4</sup>
4		1				1			1	2 <sup>3</sup>
3			1						1	2 <sup>2</sup>
6			1						1	2 <sup>1</sup>
2					1				1	2 <sup>0</sup>
Equivalente decimal	96	24	6	64	5	24	16	96	7	
Classificação	1	4	8	3	9	5	6	2	7	

Tabela 18.6(c) Solução do Exemplo 18.2

Máquinas	Peças								
	A	H	D	B	F	G	I	C	E
1	1	1	1						
5	1	1							
7				1	1	1			
4				1	1				
3							1	1	1
6							1	1	
2							1		1

as células. Outras abordagens, atribuídas a Burbidge [24], incluem (1) modificar o roteamento de maneira que todo o processamento possa ser realizado no primeiro grupo de máquinas, (2) redesenhar a peça para eliminar a exigência de processamento fora do primeiro grupo de máquinas e (3) comprar as peças de um fornecedor externo.

### 18.6.2 Dispondo máquinas em uma célula de tecnologia de grupo (TG)

Após a identificação dos agrupamentos de peça-máquina, o problema seguinte é organizar as máquinas na sequência mais lógica. Vamos descrever um método simples, mas eficiente, sugerido por Hollier [19]<sup>2</sup> que utiliza dados contidos em diagramas De/Para (Seção 10.3.1) e tem intenção de colocar as máquinas em uma ordem que maximiza a proporção de movimentos em sequência dentro da célula. O método é baseado no uso de razões De/Para determinadas pela soma do fluxo total *de* e *para* cada máquina na célula. O algoritmo pode ser reduzido a três passos:

1. *Desenvolver o diagrama De/Para.* Os dados contidos no diagrama indicam o número de movimentos de peças entre as máquinas (ou estações de trabalho) na célula. Movimentos para dentro e para fora da célula não são incluídos no diagrama.
2. *Determinar a 'razão De/Para' para cada máquina.* Para tanto, somam-se todos os movimentos 'De' e movimentos 'Para' de cada máquina (ou operação). A soma 'De' para uma máquina é determinada com o acréscimo das entradas na linha correspondente e a soma 'Para' é determinada com o acréscimo das entra-

das na coluna correspondente. Para cada máquina, a 'razão De/Para' é calculada tomando a soma 'De' para cada máquina e dividindo pela soma 'Para' respectiva.

3. *Dispondo as máquinas em ordem de razão De/Para decrescente.* Máquinas com uma alta razão De/Para distribuem mais trabalho para outras máquinas na célula, mas recebem menos trabalho. De maneira contrária, máquinas com um baixo índice De/Para recebem mais trabalho do que distribuem. Portanto, máquinas são dispostas em ordem da razão De/Para decrescente; isto é, máquinas com altas razões são colocadas no início do fluxo de trabalho e máquinas com baixas razões são colocadas no fim do fluxo de trabalho. No caso de um empate, a máquina com o valor 'De' mais alto é colocada à frente da máquina com um valor mais baixo.

#### EXEMPLO 18.3

##### Sequência de máquinas de tecnologia de grupo usando o método Hollier 2

Suponha que quatro máquinas, 1, 2, 3 e 4, pertençam a uma célula de máquinas TG. Uma análise de 50 peças processadas foi resumida no diagrama De/Para mostrado na Tabela 18.7. Informações adicionais são: 50 peças entram no agrupamento de máquinas pela máquina 3, 20 peças deixam o agrupamento após o processamento na máquina 1 e 30 peças deixam o agrupamento após a máquina 4. Determine a sequência de máquinas mais lógica utilizando o método Hollier.

**Solução:** A soma das movimentações 'De' e das movimentações 'Para' para cada máquina resulta nas somas 'De' e 'Para' da Tabela 18.8. As razões De/Para são listadas na última coluna da direita. Dispondo as máquinas na ordem da razão De/Para decrescente, as máquinas na célula devem ser colocadas em uma sequência como a seguinte:

3 - 2 - 1 - 4

É interessante utilizar uma técnica gráfica, como um diagrama em rede (Seção 10.3.1), para conceitualizar o fluxo de trabalho na célula. O diagrama em rede para a

<sup>2</sup> Para solucionar o problema da disposição de máquinas, Hollier [19] introduz seis abordagens heurísticas, das quais descrevemos apenas uma. Ele apresenta uma comparação dos seis métodos nesse estudo.

Tabela 18.7 Diagrama De/Para para o Exemplo 18.3

De	Para			
	1	2	3	4
1	0	5	0	25
2	30	0	0	15
3	10	40	0	0
4	10	0	0	0

Tabela 18.8 Somas e razões De/Para para o Exemplo 18.3

De	Para				Somas 'De'	Razão De/Para
	1	2	3	4		
1	0	5	0	25	30	0,6
2	30	0	0	15	45	1
3	10	40	0	0	50	∞
4	10	0	0	0	10	0,25
<b>Somas 'Para'</b>	<b>50</b>	<b>45</b>	<b>0</b>	<b>40</b>	<b>135</b>	

disposição de máquinas no Exemplo 18.3 é apresentado na Figura 18.12. O fluxo é em grande parte em linha; entretanto, há alguns movimentos de desvio e retrocesso de peças que têm de ser considerados no projeto de qualquer sistema de manuseio de materiais que pode ser utilizado na célula. Um transportador acionado seria apropriado para o fluxo para frente entre as máquinas, com manuseio manual para o fluxo para trás.

Três medidas de desempenho podem ser definidas para classificar as soluções do problema de se colocar as máquinas em sequência: (1) porcentagem de movimentos em sequência, (2) porcentagem de movimentos de desvio e (3) porcentagem de movimentos de retrocesso. Cada medida é calculada somando todos os valores que representam aquele tipo de movimento e dividindo pelo número total de movimentos. É desejável que a porcentagem de movimentos em sequência seja alta e que a

porcentagem de movimentos de retrocesso seja baixa. O método Hollier é projetado para alcançar essas metas. Movimentos de desvio são menos desejáveis do que movimentos em sequência, mas são certamente melhores do que movimentos de retrocesso.

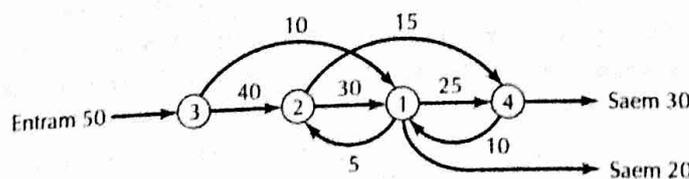
**EXEMPLO 18.4**

**Medidas de desempenho para sequências de máquinas em uma célula de TG**

Calcule (a) a porcentagem de movimentos em sequência, (b) a porcentagem de movimentos de desvio e (c) a porcentagem de movimentos de retrocesso para a solução no Exemplo 18.3.

**Solução:** da Figura 18.12, o número de movimentos em sequência =  $40 + 30 + 25 = 95$ , o número de movimentos de desvio =  $10 + 15 = 25$ , e o número de movimentos de retrocesso =  $5 + 10 = 15$ . O número total de movi-

Figura 18.12 Diagrama de rede para células de manufatura no Exemplo 18.3. O fluxo de peças entrando e saindo da célula está incluído



mentos = 135 (totalizando as somas 'De' ou as somas 'Para'). Desse modo,

(a) Porcentagem de movimentos em sequência =  $95/135 = 0,704 = 70,4\%$

(b) Porcentagem de movimentos de desvio =  $25/135 = 0,185 = 18,5\%$

(c) Porcentagem de movimentos de retrocesso =  $15/135 = 0,111 = 11,1\%$

## Referências

- [1] ANEKE, N. A. G.; CARRIE, A. S. "A design technique for the layout of multi-product flowlines". *International Journal of Production Research*, v. 24, p. 471-81, 1986.
- [2] ASKIN, R. G.; SELM, H. M.; VAKHARIA, A. J. "A methodology for designing flexible manufacturing systems". *IIE Transactions*, v. 29, p. 599-610, 1997.
- [3] BEAULIEU, A.; GHARBI, A.; AIT-KADI, A. "An algorithm for the cell formation and the machine selection problems in the design of a cellular manufacturing system". *International Journal of Production Research*, v. 35, p. 1857-74, 1997.
- [4] BLACK, J. T. "An overview of cellular manufacturing systems and comparison to conventional systems". *Industrial Engineering*, p. 36-48, nov. 1983.
- [5] \_\_\_\_\_. *The design of the factory with a future*, Nova York: McGraw-Hill Book Company, 1990.
- [6] BLACK, J. T.; HUNTER, S. L. *Lean manufacturing systems and cell design*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 2003.
- [7] BURBIDGE, J. L. "Production flow analysis". *Production Engineer*, v. 41, p. 742, 1963.
- [8] \_\_\_\_\_. *The introduction of group technology*. Nova York: John Wiley & Sons, 1975.
- [9] \_\_\_\_\_. "A manual method of production flow analysis". *Production Engineer*, Cidade, v. 56, p. 34, 1977.
- [10] \_\_\_\_\_. *Group technology in the engineering industry*. Londres: Mechanical Engineering Publications, 1979.
- [11] \_\_\_\_\_. "Change to group technology: Process organization is obsolete". *International Journal of Production Research*, v. 30, p. 1209-19, 1992.
- [12] CANTAMESSA, M.; TURRONI, A. "A pragmatic approach to machine and part grouping in cellular manufacturing systems design". *International Journal of Production Research*, v. 25, p. 835-50, 1987.
- [13] CHANDRASEKHARAN, M. P.; RAJAGOPALAN, R. "ZODIAC: An algorithm for concurrent formation of part families and machine cells". *International Journal of Production Research*, v. 25, p. 835-50, 1987.
- [14] ESPINOSA, A. "The new shape of manufacturing". *Assembly*, p. 52-4, out. 2003.
- [15] GALLAGHER, C. C.; KNIGHT, W. A. *Group technology*, Londres: Butterworth, 1973.
- [16] GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 3.ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [17] HAM, I. "Introduction to group technology". *Technical Report MMR76-93*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers, 1976.
- [18] HAM, I.; HITOMI, K.; YOSHIDA, T. *Group technology: Applications to production management*. Boston, MA: Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.
- [19] HOLLIER, R. H. "The layout of multi-product lines". *International Journal of Production Research*, v. 2, p. 47-57, 1963.
- [20] HOLTZ, R. D. "GT and CAPP cut work-in-process time 80%". *Assembly Engineering*, parte 1, p. 24-7, jun, 1978; parte 2, p. 16-9, jul. 1978.
- [21] HYER, N. L.; WEMMERLOV, U. "Group technology in the U.S. manufacturing industry: A survey of current practices". *International Journal of Production Research*, v. 27, p. 1287-304, 1989.
- [22] \_\_\_\_\_. *Reorganizing the Factory: Competing through cellular manufacturing*, Portland, OR: Productivity Press, 2002.
- [23] IRANI, S. A.; CAVALIER, T. M.; COHEN, P. H. "Virtual manufacturing cells: Exploiting layout design and intercell flows for the machine sharing problem". *International Journal of Production Research*, v. 31, p. 791-810, 1993.
- [24] KING, J. R. "Machine-component grouping in production flow analysis: An approach using a rank order clustering algorithm". *International Journal of Production Research*, 18, p. 213-22, 1980.
- [25] KUSIAK, A. "EXGT-S: A knowledge based system for group technology". *International Journal of Production Research*, v. 26, p. 1353-67, 1988.
- [26] LYNCH, M. *Computer numerical control for machining*. Nova York: McGraw-Hill, 1992.
- [27] MONDEN, Y. *Toyota production system*. Norcross, GA: Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers, 1983.
- [28] MOODIE, C.; UZSOY, R.; YIH, Y. *Manufacturing cells: A system engineering view*. Londres: Taylor & Francis, 1995.

OLIVIA

SONY

OLIVIA  
Lectura de  
CD/DVD/MP3

[29] OPITZ, H. *A classification system to describe workpieces*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1970.

[30] OPITZ, H.; WIEDAHL, H. P. "Group technology and manufacturing systems for medium quantity production". *International Journal of Production Research*, v. 9, n. 1, p. 181-203, 1971.

[31] SINGH, N.; RAJAMI, D. *Cellular manufacturing systems: Design, planning, and control*. Londres: Chapman & Hall, 1996.

[32] WEMMERLOV, U.; HYER, N. L. "Cellular manufacturing in U.S. industry: A survey of users". *International Journal of Production Research*, Cidade, v. 27, p. 1511-30, 1989.

[33] \_\_\_\_\_. "Group Technology". In: SALVENDY, G. (ed.) *Handbook of industrial engineering*, Nova York: John Wiley & Sons, 1992. p. 464-88.

[34] WILD, R. *Mass production management*, Londres: John Wiley & Sons, 1972.

## Questões de revisão

- 18.1 O que é tecnologia de grupo?
- 18.2 O que é manufatura celular?
- 18.3 Quais são as condições de produção sob as quais a tecnologia de grupo e a manufatura celular são mais aplicáveis?
- 18.4 Quais são as duas maiores iniciativas que uma empresa deve tomar ao implementar a tecnologia de grupo?
- 18.5 O que é uma família de peças?
- 18.6 Quais são os três métodos para solucionar o problema de agrupar peças em famílias?
- 18.7 Qual é a diferença entre uma estrutura hierárquica e uma estrutura do tipo cadeia em um esquema de classificação e codificação?
- 18.8 O que é uma análise do fluxo de produção?
- 18.9 Quais são os objetivos típicos da implementação da manufatura celular?
- 18.10 Qual é o conceito de peça composta, como o termo é aplicado na tecnologia de grupo?
- 18.11 Quais são as quatro configurações de células de TG comuns, como identificadas no texto?
- 18.12 Qual é o conceito de máquina-chave na manufatura celular?
- 18.13 Qual é a diferença entre uma célula virtual e uma célula formal?
- 18.14 Qual é a principal aplicação da tecnologia de grupo no projeto de produto?
- 18.15 Qual é a aplicação do agrupamento por ordem de classificação (ROC)?

## Problemas

### Classificação e codificação de peças

- 18.1 Desenvolva o código (primeiros cinco dígitos) no Sistema Opitz para a peça ilustrada na Figura P18.1.
- 18.2 Desenvolva o código (primeiros cinco dígitos) no Sistema Opitz para a peça ilustrada na Figura P18.2.
- 18.3 Desenvolva o código (primeiros cinco dígitos) no Sistema Opitz para a peça ilustrada na Figura P18.3

### Agrupamento por ordem de classificação (ROC)

- 18.4 Aplique a técnica ROC à matriz peça-máquina da tabela seguinte para identificar famílias de peças e grupos

de máquinas lógicas. Peças são identificadas por letras e máquinas são identificadas numericamente.

Máquinas	Peças				
	A	B	C	D	E
1	1				
2		1			1
3	1			1	
4		1	1		
5				1	

- 18.5 Aplique a técnica ROC à matriz peça-máquina da tabela seguinte para identificar famílias de peças e grupos de máquinas lógicas. Peças são identificadas por letras e máquinas são identificadas numericamente.