

Operações de produção*



CONTEÚDO DO CAPÍTULO

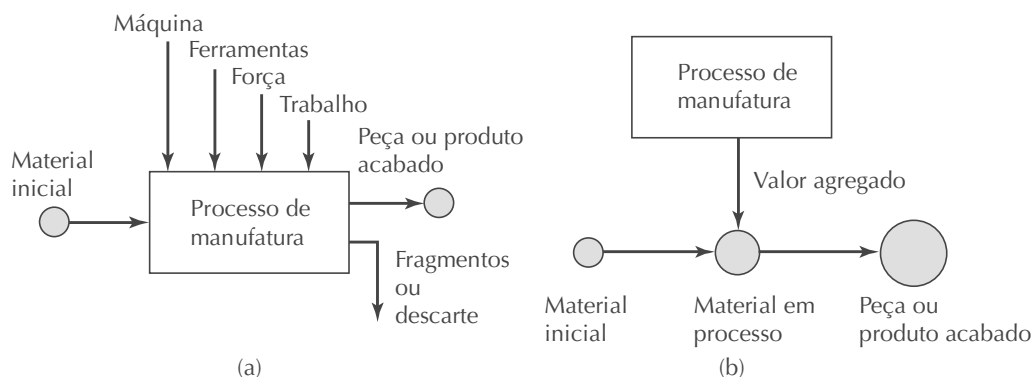
- 2.1 Setores de produção e produtos
- 2.2 Operações de produção
 - 2.2.1 Operações de processamento e montagem
 - 2.2.2 Outras operações de fábrica
- 2.3 Instalações da produção
 - 2.3.1 Produção baixa
 - 2.3.2 Produção média
 - 2.3.3 Produção alta
- 2.4 Relação produto/produção
 - 2.4.1 Quantidade produzida e variedade do produto
 - 2.4.2 Complexidade do produto e da peça
 - 2.4.3 Limitações e capacidades da planta de produção
- 2.5 Produção enxuta

A *manufatura*, ou produção, pode ser definida como a aplicação de processos físicos e químicos na alteração da geometria, de propriedades e/ou da aparência de determinado material inicial com vistas a produzir peças ou produtos. Ela também inclui a junção de diferentes peças para a criação de produtos montados. Os processos envolvidos na produção englobam uma combinação de máquinas, ferramentas, força e trabalho manual, conforme descrito na Figura 2.1(a), e quase sempre acontecem como uma sequência de operações. Cada operação sucessiva faz com que o material fique mais próximo do estado final desejado.

Do ponto de vista econômico, a produção preocupa-se com a transformação de materiais em itens de maior valor por meio de uma ou mais operações de processamento e/ou montagem, conforme mostra a Figura 2.1(b). O ponto mais importante é que a produção *agrega valor* ao material por meio da mudança de sua forma ou de suas propriedades ou da combinação do material com outros que também já foram alterados. Quando o minério de ferro é convertido em aço, agrega-se valor. O mesmo acontece quando a areia é transformada em vidro e o petróleo é refinado e transformado em plástico. E, quando o plástico, por sua vez, é moldado segundo uma complexa geometria e transformado em uma cadeira, ele se torna ainda mais valioso.

Neste capítulo, oferecemos uma análise das operações de produção. Começamos pela avaliação das indús-

* A Introdução e as seções 2.1 e 2.2 deste capítulo baseiam-se em GROOVER, M. P. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems*, Capítulo 1.

Figura 2.1 Definições alternativas de produção: (a) como processo tecnológico e (b) como processo econômico

trias engajadas na produção e dos tipos de produtos que fabricam. Em seguida, discutimos os processos de fabricação e montagem e as atividades que os apoiam, como o tratamento e a inspeção de materiais. Depois disso, apresentamos diversos parâmetros de produtos, como quantidade de produção, variedade e complexidade, e exploramos a influência que exercem sobre as operações de produção e as instalações necessárias à realização dessas

operações. O capítulo se encerra com uma breve introdução à produção enxuta — uma abordagem que visa a minimizar o desperdício e maximizar a produção.

A história da produção inclui tanto o desenvolvimento dos processos de fabricação, alguns datados de milhares de anos atrás, como a evolução dos sistemas de produção necessários na aplicação dos processos (Nota histórica 2.1). A ênfase deste livro é nos sistemas.



Nota histórica 2.1

História da produção

A história da produção inclui dois tópicos: (1) a descoberta e a invenção de materiais e processos para fazer coisas e (2) o desenvolvimento dos sistemas de produção. Os materiais e processos antecedem os sistemas em muitos milênios. Os sistemas de produção referem-se ao modo de organização de pessoas e equipamentos de maneira que a produção possa ser realizada de forma mais eficiente. Alguns dos processos mais básicos datam do período neolítico (entre 8.000-3.000 a.C.), quando foram desenvolvidas operações como *carpintaria*, *moldagem* e *cozedura* de argila, *moagem* e *polimento* de pedras, *fiação* de fibras e *tecelagem* e *tingimento* de tecidos. A metalurgia também teve início durante o período neolítico, na Mesopotâmia e em outras áreas ao redor do Mediterrâneo. Ela também se espalhou, ou se desenvolveu de forma independente, em regiões da Europa e da Ásia. Os primeiros humanos encontraram ouro em uma forma tão pura na natureza que podia ser *moldado com um martelo*. É provável que o cobre tenha sido o primeiro metal extraído dos minérios, o que demandou a utilização da *fundição* como uma técnica de processamento. O cobre não podia ser diretamente tratado com um martelo porque deformava. Assim sendo, era modelado por meio de fundição e *moldagem*. Prata e estanho também eram utilizados nessa época. Descobriu-se que a combinação do cobre com o estanho produzia um metal mais maleável do que o cobre puro e que permitia tanto a moldagem por martelo como aquela por fundição. Isso impulsionou um período conhecido como *Idade do Bronze* (entre 3.500-1.500 a.C.).

O ferro foi fundido pela primeira vez nesse período. Meteoritos podem ter sido uma das fontes do metal, mas o ferro também foi minerado. As temperaturas necessárias à redução do ferro minerado em metal são muito mais altas do que as exigidas pelo cobre, o que dificultava as operações de forno. Os primeiros ferreiros aprenderam que, quando determinados ferros (aqueles contendo pequenas quantida-

des de carbono) eram corretamente aquecidos e *temperados* (mergulhados em água para resfriar), eles se tornavam muito resistentes. Isso permitia que pontas afiadas fossem amoladas e transformadas em facas e armas, mas também deixava o metal mais frágil. A resistência podia ser aumentada pelo reaquecimento à baixa temperatura, um processo conhecido como *têmpera*. Descrevemos aqui o *tratamento térmico* do aço. Suas propriedades superiores fizeram com que o metal substituísse o bronze em muitas aplicações (artilharia, agricultura e dispositivos mecânicos). O período de seu uso ficou conhecido como *Idade do Ferro* (iniciada em torno de 1.000 a.C.). Não tardou para que a demanda por aço aumentasse, já no século XIX, e novas técnicas de tratamento de metal fossem desenvolvidas.

A fabricação inicial de utensílios e armas realizava-se mais como arte e moeda de troca do que como a produção que conhecemos hoje em dia. Os antigos romanos tinham o que poderia ser chamado de fábricas para produção de armas, pergaminhos, cerâmica, objetos de cristal e outros produtos da época, mas os procedimentos baseavam-se amplamente no trabalho manual. Somente na época da *Revolução Industrial* (em torno de 1760-1830) é que as principais mudanças começaram a afetar os sistemas de produção de coisas. Esse período marcou a transição de uma economia baseada na agricultura e no trabalho artesanal para outra baseada na indústria e na produção. A mudança começou na Inglaterra, onde uma série de máquinas importantes foi inventada, a máquina a vapor começou a substituir a força animal, da água e do vento. Inicialmente, esses avanços ofereceram vantagens significativas para a indústria britânica em relação a outras nações, mas a revolução acabou se espalhando por outros países europeus e pelos Estados Unidos. A Revolução Industrial contribuiu para o desenvolvimento da produção das seguintes maneiras: (1) *A máquina a vapor de Watt*, uma nova tecnologia de geração de energia; (2) o desenvolvimento de *máquinas-ferramenta*, começando com a broqueadeira de John Wilkinson, por volta de 1775, que foi utilizada para perfurar a máquina a vapor de Watt; (3) invenção da *máquina de fiar*, do *tear mecânico* e de outras máquinas para a indústria têxtil, o que permitiu melhorias significativas na produtividade; e (4) o *sistema de produção*, uma nova maneira de organizar trabalhadores da produção com base na divisão do trabalho.

A broqueadeira de Wilkinson normalmente marca o início da tecnologia de máquinas-ferramenta. Era movida à água. Entre 1775 e 1850, outras máquinas-ferramenta foram desenvolvidas para a maioria dos processos convencionais de usinagem, tais como *furação*, *torneamento*, *fresamento*, *polimento*, *conformação* e *plainamento*. A máquina a vapor tornou-se a fonte de energia preferida para a maioria dessas máquinas à medida que foi sendo difundida. É interessante observar que muitos processos individuais foram criados séculos antes das máquinas-ferramenta. Perfuração, serração e torneamento (de madeira), por exemplo, existem desde os velhos tempos.

Métodos de montagem foram utilizados em culturas antigas na confecção de navios, armas, ferramentas, utensílios de fazenda, maquinários, carroças e carrinhos, mobília e vestuário. Os processos incluíam *união* com fio e corda, *soldagem*, *rebitagem* e *pregagem*. Por volta da era de Cristo, foram desenvolvidas a *soldagem* e a *colagem*. O amplo uso de parafusos, arruelas e porcas — tão comuns nas montagens atuais — exigiram o desenvolvimento de máquinas-ferramenta, em especial o torno mecânico de Maudsley (1800), que fazia roscas helicoidais com precisão. Somente por volta de 1900 os processos de *soldagem por fusão* começaram a ser desenvolvidos como técnicas de união.

Enquanto a Inglaterra liderava a Revolução Industrial, um importante conceito relacionado à tecnologia de montagem estava sendo introduzido nos Estados Unidos: o da produção de *peças intercambiáveis*. O crédito desse conceito costuma ser atribuído a Eli Whitney (1765-1825), mas sua importância foi reconhecida por outros [3]. Em 1797, Whitney negociou um contrato para a produção de 10 mil mosquetes para o governo norte-americano. Na época, o método tradicional de montagem de armas envolvia a fabricação sob medida de cada uma das peças de uma arma em particular e o agrupamento manual das peças para montagem da arma por meio de *polimento*. Cada mosquete era, portanto, único, e o tempo para construí-lo era considerável. Whitney acreditava que era possível fazer os componentes com precisão capaz de permitir que as partes fossem montadas sem ajustes. Depois de anos de desenvolvimento em sua fábrica em Connecticut, ele viajou a Washington em 1801 para demonstrar seu princípio. Diante dos oficiais do governo, inclusive Thomas Jefferson, ele dispôs componentes para dez mosquetes e, aleatoriamente, começou a selecionar peças para montar armas. Nenhum polimento ou ajuste especial era necessário e todas as armas funcionavam com perfeição. O segredo por trás de seu feito estava na coleção de máquinas, complementos e medidores especiais que desenvolvera e em sua fábrica. A produção de peças intercambiáveis demandou muitos anos de desenvolvimento e refino antes de se tornar uma realidade

prática, no entanto, revolucionou os métodos de produção. É um pré-requisito para a produção em massa de produtos montados. Como surgiu nos Estados Unidos, a produção de peças intercambiáveis é conhecida como o *Sistema Americano* de produção.

A partir da metade da década de 1800, iniciou-se a expansão de estradas de ferro, navios movidos a vapor e de outras máquinas que criaram uma demanda constante por ferro e aço. Novos métodos de produção de aço foram criados para atender tal demanda. Além disso, diversos produtos de consumo foram desenvolvidos durante esse período, incluindo máquinas de costura, bicicletas e automóveis. Para atender à demanda massiva por esses produtos, foi necessária a criação de métodos de produção mais eficientes. Alguns historiadores chamam os avanços ocorridos nesse período de *Segunda Revolução Industrial*, caracterizada por seus efeitos sobre os sistemas de produção pelas seguintes características: (1) produção em massa; (2) linhas de montagem; (3) movimento da administração científica; e (4) eletrificação das fábricas.

A *produção em massa* foi primeiramente um fenômeno norte-americano. Foi motivada pelo mercado de massa que existia nos Estados Unidos, cuja população, em crescimento, era de 76 milhões de pessoas em 1900. Em 1920, excedia 106 milhões. Uma população tão grande, maior do que a de qualquer país europeu, criou uma demanda por um número maior de produtos. A produção em massa passou a fornecê-los. Uma das tecnologias importantes desse tipo de produção era a *linha de montagem*, introduzida por Henry Ford (1863-1947) em 1913 na fábrica de Highland Park (Nota histórica 15.1). A linha de montagem viabilizou a produção de complexos produtos de consumo. Em 1916, o uso dos métodos da linha de montagem permitiu que Ford vendesse um automóvel Modelo T por menos de US\$ 500, o que tornou viável a aquisição de carros para uma grande parcela da população americana.

O movimento da *administração científica* começou no fim da década de 1800, nos Estados Unidos, em resposta à necessidade de planejar e controlar as atividades de um número crescente de trabalhadores na produção. O movimento foi liderado por Frederick W. Taylor (1856-1915), Frank Gilbreath (1868-1924) e sua esposa Lilian (1878-1972), dentre outros. A administração científica inclui: (1) *estudo do movimento*, cujo objetivo é encontrar o melhor método para execução de determinada tarefa; (2) *estudo do tempo*, para que se estabeleçam padrões de trabalho para uma atividade; (3) uso extensivo de *padrões* no setor; (4) *sistema de pagamento por peça produzida* e outros planos de incentivo semelhantes; (5) uso de coleta de dados, manutenção de registros e contabilidade dos custos nas operações de fábrica.

Em 1881, teve início a *eletrificação* com a construção, na cidade de Nova York, da primeira estação de geração de energia elétrica. A utilização de motores elétricos como fonte de energia para a operação do maquinário das fábricas não tardou a acontecer. Esse método de sistema de energia era muito mais conveniente do que a máquina a vapor, que usava polias deslizantes na distribuição mecânica de energia entre as máquinas. Em 1920, a eletricidade já tinha ultrapassado o vapor como principal fonte de energia nas fábricas norte-americanas. A eletrificação também motivou muitas invenções que afetaram as operações e os sistemas de produção. O século XX foi uma época de mais avanços tecnológicos do que todos os outros juntos, muitos deles resultando na *automação* da produção. Este livro inclui algumas notas históricas sobre esses avanços na automação.

2.1 SETORES DE PRODUÇÃO E PRODUTOS

A produção é uma atividade comercial importante, executada por empresas que vendem produtos a clientes. O tipo de produção realizada por uma empresa depende dos tipos de produtos que ela faz. Vamos primeiro analisar o escopo dos setores de produção e, em seguida, avaliar seus produtos.

Setores de produção. Um setor é formado por empresas e organizações que produzem e/ou fornecem bens e/ou serviços. Os setores podem ser classificados como primários, secundários ou terciários. *Setores primários* são aqueles que cultivam e exploram recursos naturais, como

agricultura e mineração. *Setores secundários* convertem os resultados da exploração do setor primário em produtos. A produção é a principal atividade nessa categoria, mas os setores secundários também incluem a construção e a geração de energia. *Setores terciários* constituem o setor de serviços da economia. A Tabela 2.1 apresenta uma lista de setores específicos de cada uma dessas categorias.

Neste livro, preocupamo-nos com os setores secundários (listados na coluna central da Tabela 2.1), que são aqueles compostos por empresas engajadas na produção. É útil diferenciar os setores de processos daqueles que produzem peças discretas e produtos. Os setores de processos incluem indústrias química, farmacêutica, petrolífera, de metais básicos, alimentícia, de bebidas e de

Tabela 2.1 Indústrias específicas nos setores primário, secundário e terciário. Baseada principalmente na Classificação Industrial Internacional Padrão (*International Standard Industrial Classification — ISIC*) utilizada pela Organização das Nações Unidas (ONU)

Primário	Secundário	Terciário (Serviços)
Agricultura	Aeroespacial	Bancário
Florestal	Aparelhagem	Comunicações
Pesca	Automotivo	Educação
Pecuária	Metais básicos	Entretenimento
Caça	Bebidas	Serviços financeiros
Mineração	Materiais de construção	Governo
Petróleo	Químicos	Saúde e médico
	Computadores	Hotéis
	Construção	Informações
	Aparelhos elétricos	Seguros
	Eletrônicos	Serviços legais
	Equipamentos	Imobiliário
	Metais fabricados	Reparos e manutenção
	Processamento alimentar	Restaurantes
	Vidro, cerâmica	Comércio a varejo
	Máquinas pesadas	Turismo
	Papel	Transportes
	Refino de petróleo	Comércio atacadista
	Farmacêuticos	
	Plásticos (moldagem)	
	Geração de energia	
	Publicação	
	Têxteis	
	Pneus e borrachas	
	Madeira e mobília	

geração de energia elétrica. Os setores de produtos discretos incluem indústrias de automóveis, aeronaves, eletrodomésticos, computadores, máquinas e componentes a partir dos quais esses produtos são montados. A Tabela 2.2 lista as indústrias segundo o tipo de produto produzido conforme a Classificação Industrial Internacional Padrão (*International Standard Industrial Classification — ISIC*). Em geral, as indústrias de processos são listadas entre os códigos 31-37 da ISIC, enquanto as indústrias de produtos discretos aparecem entre os códigos 38-39. Entretanto, deve-se reconhecer que muitos produtos fabricados por

indústrias de processos acabam vendidos aos consumidores como unidades discretas. Por exemplo, as bebidas são vendidas em garrafas e latas. Os farmacêuticos normalmente são adquiridos em comprimidos e cápsulas.

Nas indústrias de processo e nas de produtos discretos, as operações de produção podem ser divididas em produção contínua e produção em lote. As diferenças são mostradas na Figura 2.2.

A *produção contínua* ocorre quando o equipamento de produção é utilizado exclusivamente para um determinado produto cuja produção não para. Nas indústrias de

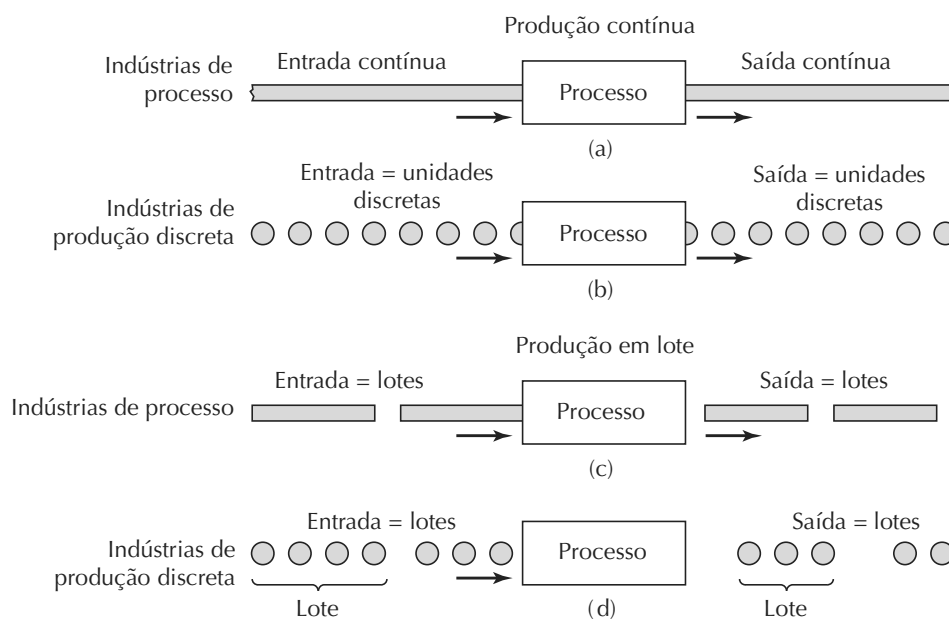
Tabela 2.2 Códigos da Classificação Industrial Internacional Padrão (*International Standard Industrial Classification — ISIC*) para diferentes indústrias no setor de produção

Código básico	Produtos fabricados
31	Alimentos, bebidas (alcoólicas ou não), tabaco
32	Têxteis, vestuário, produtos em couro, produtos de pele
33	Madeira e produtos em madeira (móveis, por exemplo), produtos de cortiça
34	Papel, produtos de papel, impressão, publicação, encadernação
35	Químicos, carvão, petróleo, plástico, borracha, produtos feitos desses materiais, farmacêuticos
36	Cerâmicas (incluindo vidro), produtos minerais não metálicos (cimento, por exemplo)
37	Metais básicos (aço e alumínio, por exemplo)
38	Produtos de metais fabricados, máquinas, equipamentos (por exemplo, aeronaves, câmeras, computadores e outros equipamentos de escritório, máquinas, veículos motores, ferramentas, televisores)
39	Outros produtos manufaturados (por exemplo, joias, instrumentos musicais, produtos esportivos, brinquedos)

processo, a produção contínua significa que o processo é executado sobre uma cadeia contínua de materiais, sem interrupções no fluxo de produção, conforme sugere a Figura 2.2(a). O material processado pode estar em forma de líquido, gás, pó ou em outro estado. Nas indústrias de

produção discreta, a produção contínua significa dedicação integral do equipamento ao produto ou peça produzida, sem pausas para troca de produto. Conforme mostra a Tabela 2.2(b), as unidades individuais do produto são identificáveis.

Figura 2.2 Produção contínua e em lote nas indústrias de processo e de produção discreta, incluindo (a) produção contínua nas indústrias de processo; (b) produção contínua nas indústrias de produção discreta; (c) produção em lote nas indústrias de processo; (d) produção em lote nas indústrias de produção discreta



A *produção em lote* ocorre quando os materiais são processados em quantidades ou montantes finitos, chamados *lotes* tanto na indústria de processos como na de produção discreta. A produção em lote não é contínua, visto que há interrupções na produção entre os lotes. A razão para utilização desse tipo de produção se deve ao fato de a natureza do processo exigir que somente uma quantidade finita de material seja acomodada por vez (por exemplo, o montante de material pode ser limitado pelo tamanho do recipiente utilizado no processamento) e/ou porque existem diferenças entre as partes ou os produtos feitos em diferentes lotes (por exemplo, um lote de 20 unidades da peça A seguido por um lote de 50 unidades da peça B em uma operação de máquina, e a necessidade de alteração de configuração entre os lotes por conta de diferenças nas ferramentas e nos acessórios necessários). As diferenças da produção em lote nas indústrias de processo e nas de produção discreta são listadas na Tabela 2.2(c) e (d). Nas indústrias de processo, a produção em lote geralmente significa que os produtos iniciais estão na forma líquida ou granel, e são processados juntos como uma única unidade. Em contrapartida, nas indústrias de produção discreta, um lote representa uma determinada quantidade de unidades de trabalho, processadas individualmente e não todas ao mesmo tempo. O número de peças em um lote pode variar de um a milhares de unidades.

Produtos manufaturados. Conforme indicado na Tabela 2.2, os setores secundários incluem alimentos, be-

bidas, têxteis, madeira, papel, publicação, químicos e metais básicos (códigos ISIC 31-37). Este livro é primeiramente direcionado às indústrias que produzem produtos discretos (códigos ISIC 38-39). Os dois grupos interagem entre si e muitos dos conceitos e sistemas discutidos aqui podem ser aplicados nas indústrias de processo, mas nossa atenção volta-se, principalmente, para a produção de equipamentos discretos, que variam de parafusos e porcas a carros, aeronaves e computadores digitais. A Tabela 2.3 lista as indústrias de produção e seus produtos correspondentes nos quais os sistemas de produção descritos neste livro podem ser aplicados.

Os produtos finais produzidos pelas indústrias listadas na Tabela 2.3 podem ser divididos em duas classes principais: bens de consumo e bens de capital. Os *bens de consumo* são produtos adquiridos diretamente pelos consumidores, tais como carros, computadores pessoais, televisores, pneus, brinquedos e raquetes de tênis. Os *bens de capital* são produtos adquiridos por outras empresas para a produção de bens e prestação de serviços. Exemplos de bens de capital incluem aeronaves comerciais, computadores de grande porte, máquinas-ferramenta, equipamentos ferroviários e maquinário para a construção.

Além dos produtos finais, que costumam ser montados, existem empresas no setor cujo negócio é primeiramente produzir materiais, componentes e suprimentos para as empresas que fazem o produto final. Exemplos desses itens incluem folhas de aço, vergalhões de precisão, estampagem de metal, partes usinadas em conjunto, mol-

Tabela 2.3 Indústrias de produção cujos produtos podem ser produzidos pelos sistemas discutidos neste livro

Indústria	Produtos típicos
Aeroespacial	Aeronaves comerciais e militares
Aparelhos elétricos	Utensílios domésticos de pequeno e grande portes
Automotiva	Carros, caminhões, ônibus, motocicletas
Computadores	Computadores pessoais e de grande porte
Eletrônicos	Televisores, aparelhos de DVD, equipamentos de som, consoles de videogame
Equipamentos industriais	Máquinas, equipamentos ferroviários
Máquinas pesadas	Máquinas-ferramenta, equipamentos para construção
Metais fabricados	Peças de máquinas, selagem de metais, ferramentas
Plástico (modelagem)	Moldes de plástico, extrusores
Pneu e borracha	Pneus, solas de sapato, bolas de tênis
Vidro, cerâmica	Produtos de vidro, ferramentas em cerâmica, utensílios de cerâmica

dagem em plástico, ferramentas de corte, feira, moldes e lubrificantes. Assim sendo, as indústrias de produção constituem uma infraestrutura complexa, com várias categorias e camadas de fornecedores intermediários com os quais o consumidor nunca lida.

2.2 OPERAÇÕES DE PRODUÇÃO

Existem certas atividades básicas que devem ser executadas em uma fábrica de modo a converter matérias-primas em produtos acabados. Limitando nosso escopo a uma fábrica envolvida na fabricação de produtos discretos, as atividades da fábrica são (1) operações de processamento e montagem; (2) manuseio de materiais; (3) inspeção e teste; e (4) coordenação e controle.

As três primeiras atividades são atividades físicas que ‘tocam’ o produto enquanto ele é feito. As operações de processamento e montagem alteram a geometria, as propriedades e/ou a aparência do item que está sendo trabalhado. Elas agregam valor ao produto. O produto deve passar da operação atual para a seguinte na sequência de produção e deve ser inspecionado e/ou testado para garantir a alta qualidade. Argumenta-se que o manuseio de materiais e as atividades de inspeção não agregam valor ao produto. Entretanto, podem ser necessários para acompanhar a execução de operações de processamento e montagem necessárias como, por exemplo, o carregamento de peças em uma máquina de produção e a garantia de que uma unidade de trabalho inicial é de boa qualidade antes que o processamento comece. Acreditamos que se agrega valor pela totalidade das operações de produção executadas sobre o produto. Todas as operações desnecessárias — seja de processamento, montagem, manuseio de materiais ou inspeção — devem ser eliminadas da sequência de etapas necessárias à conclusão de determinado produto. Retomamos essas ideias na discussão sobre produção enxuta, na Seção 2.5.

2.2.1 Operações de processamento e montagem

Os processos de produção podem ser divididos em dois tipos básicos: (1) operações de processamento e (2) operações de montagem. Uma *operação de processamento* transforma um material de trabalho em um estado de completude para um estado mais avançado e que está mais próximo da peça ou produto desejado. Ela agrega valor por meio da alteração da geometria, das propriedades ou da aparência do material inicial. Em geral, as operações de processamento são executadas sobre peças individuais, mas algumas dessas operações também podem ser aplicadas a itens montados, como, por exemplo, a pintura da

carroceria metálica de um carro. Uma *operação de montagem* junta dois ou mais componentes para criar uma nova entidade, denominada montagem, submontagem ou outro termo qualquer que faça referência ao processo específico de montagem. A Figura 2.3 mostra uma classificação dos processos de produção e como eles se dividem em várias categorias.

Operações de processamento. Uma operação de processamento usa energia para alterar forma, propriedades físicas ou aparência de uma peça de modo a agregar valor ao material. A energia pode ser mecânica, térmica, elétrica ou química e é aplicada de modo controlado por meio das máquinas e das ferramentas. A energia humana também pode ser necessária, mas trabalhadores humanos costumam atuar no controle de máquinas, na fiscalização de operações e no carregamento e descarregamento de peças antes e depois de cada ciclo de operação. Um modelo geral da operação de processamento é reproduzido na Figura 2.1(a). O material entra no processo, máquinas e ferramentas aplicam energia para transformar o material e a peça de trabalho concluída sai do processo. Conforme mostra o modelo, a maior parte das operações de produção fabrica fragmentos ou material a ser descartado, seja como subproduto do processo (ou seja, removendo material, como na usinagem) ou na forma ocasional de peças defeituosas. Um objetivo almejado na produção é a redução do descarte em qualquer uma dessas duas formas.

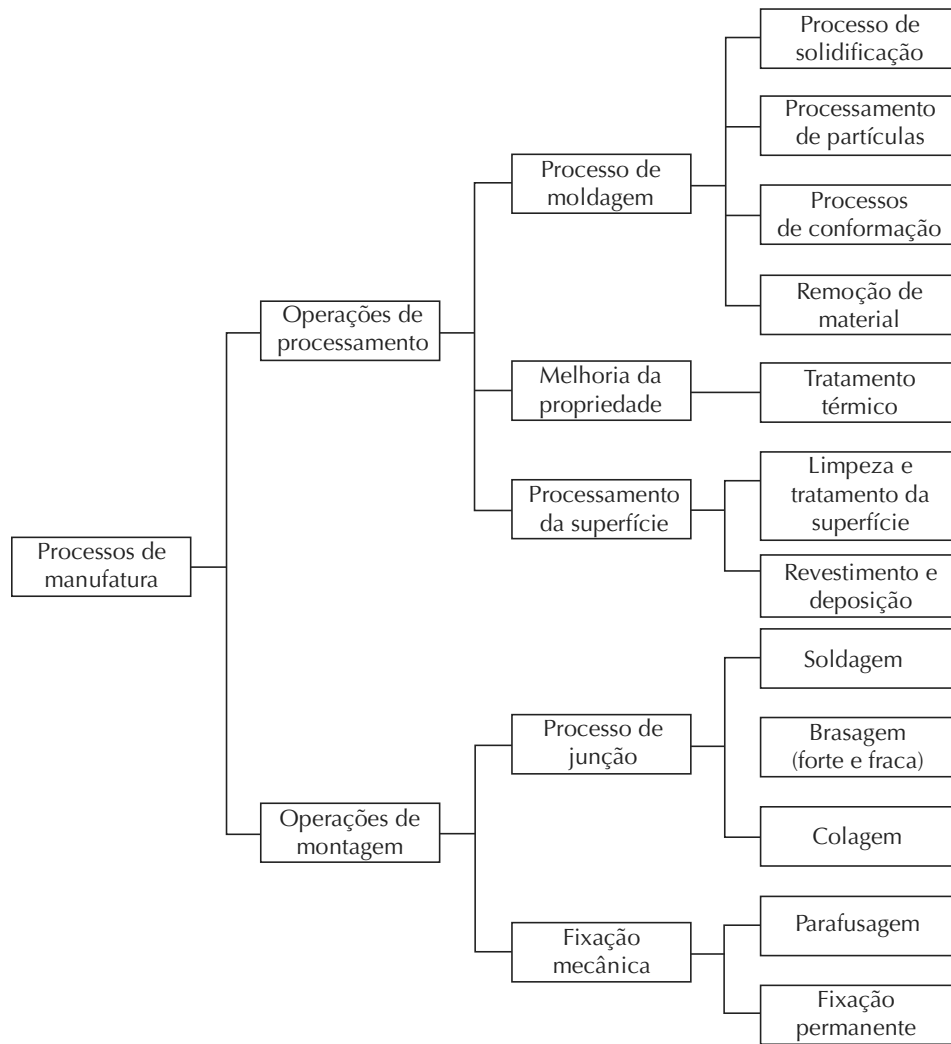
Mais de uma operação de processamento costuma ser necessária na transformação do material inicial no resultado final. As operações são executadas na sequência particular para o alcance da geometria e/ou da condição definida na especificação do projeto.

Existem três categorias de operações de processamento: (1) operações de moldagem; (2) operações de melhoria da propriedade; e (3) operações de processamento da superfície.

As *operações de moldagem de peças* aplicam força mecânica e/ou calor ou outras formas e combinações de energia para alterar a geometria do material de trabalho. Existem diversas maneiras de classificar esse processo. A categorização que utilizamos aqui se baseia no estado do material inicial. As categorias são quatro:

1. **Processos de solidificação.** Nessa categoria, os processos importantes são os de *fundição* (para metais) e *moldagem* (para plásticos e vidros), nos quais o material inicial é um líquido aquecido ou semifluido que pode ser depositado ou forçado a escorrer para a cavidade de um molde no qual esfria e solidifica, assumindo forma idêntica à do molde.

Figura 2.3 Classificação dos processos de produção



2. *Processamento de partículas.* O material inicial é um pó. A técnica mais comum envolve a *prensagem* a alta pressão do pó em um molde-matriz para fazer com que ele tome sua forma. Entretanto, a peça compactada não é forte o suficiente para ser utilizada de maneira útil. Para aumentar sua resistência, a peça é, então, *sinterizada* — aquecida a uma temperatura abaixo do ponto de fusão —, o que faz com que as partículas individuais se aglutinem. Tanto os metais (metalurgia do pó) como a cerâmica (ou seja, os produtos de argila) podem ser criados pelo processamento de partículas.

3. *Processos de conformação.* Na maioria dos casos, o material inicial é um metal maleável moldado por meio da aplicação de pressões que excedem a resistência do metal. Para aumentar a maleabilidade, o metal normalmente é aquecido antes da conformação. Os processos de conformação incluem *forjamento*, *extrusão* e *laminação*. Também incluídos nessa categoria estão os processos que trabalham com o metal em folha, como *trefilação*, *moldagem* e *dobramento*.

4. *Remoção de material.* O material inicial é um sólido (em geral, um metal, maleável ou rígido) a partir do qual o material excessivo é removido da peça de trabalho inicial de modo que a peça resultante tenha a geometria desejada. A etapa mais importante nessa categoria é a de operações de *usinagem*, como *torneamento*, *furação* e *fresamento*, alcançadas com a utilização de ferramentas de corte afiadas que são mais resistentes do que o metal trabalhado. O *polimento* é outro processo comum nessa categoria, no qual um rebolo abrasivo é utilizado na remoção de material. Outros processos de remoção de material são conhecidos como *processos não convencionais*, pois não usam ferramentas tradicionais de corte e polimento. Em vez disso, baseiam-se na utilização de laser, feixes de elétrons, erosão química, descarga elétrica ou energia eletroquímica.

As *operações de melhoria da propriedade* servem para melhorar as propriedades mecânicas ou físicas do material de trabalho. As operações de melhoria mais im-

portantes envolvem tratamentos térmicos, que incluem fortalecimento induzido por temperatura e/ou processos de enrijecimento para metais e vidros. A sinterização de metais em pó e cerâmica, mencionada anteriormente, também é um tratamento térmico que fortalece uma peça em pó prensada. As operações de melhoria da propriedade não alteram a forma da peça, exceto de maneira não intencional em alguns casos, como, por exemplo, a deformação de uma peça de metal durante o aquecimento térmico ou a diminuição de uma peça de cerâmica durante a sinterização.

As *operações de processamento da superfície* incluem processos de (1) limpeza; (2) tratamentos superficiais; e (3) revestimento e deposição da camada metálica. A *limpeza* utiliza processos químicos e mecânicos para a remoção de sujeira, óleo ou outro contaminante qualquer da superfície. Os *tratamentos superficiais* incluem trabalho mecânico, como o *shot peening* (bombardeamento com esferas para encruamento superficial) e jateamento de areia, e processos físicos, como difusão e implantação de íon. Os processos de *revestimento e deposição de camada fina* aplicam uma camada de material ao exterior da superfície da peça de trabalho. Os processos comuns de revestimento incluem *galvanoplastia*, *anodização* do alumínio e revestimento orgânico (chamado *pintura*). Os processos de deposição da camada fina incluem *deposição física de vapor* e *deposição química de vapor* para formar revestimentos extremamente finos de várias substâncias. Diversas operações de processamento da superfície foram adaptadas de modo a fabricar materiais semicondutores (mais comumente, silício) em circuitos integrados usados na microeletrônica. Esses processos incluem deposição química do vapor, deposição física do vapor e oxidação. Eles são aplicados a áreas bastante localizadas na superfície do fino *wafer* de silício (ou outro material semicondutor) para criar um circuito microscópico.

Operações de montagem. O segundo tipo básico de operação de produção é a montagem, na qual duas ou mais partes separadas são ligadas para formar uma nova entidade. Os componentes dessa nova entidade podem ser ligados de forma permanente ou semipermanente. Os processos de junção permanente incluem *soldagem*, *brasagem forte*, *brasagem fraca* e *colagem*. Eles combinam peças por meio da formação de uma nova entidade que não pode ser desconectada com facilidade. Os métodos de montagem mecânica estão disponíveis para fixar duas ou mais peças juntas em uma nova entidade que pode ser convenientemente desmontada. O uso de *parafusagem* (ou seja, de parafusos, porcas e arruelas) é um

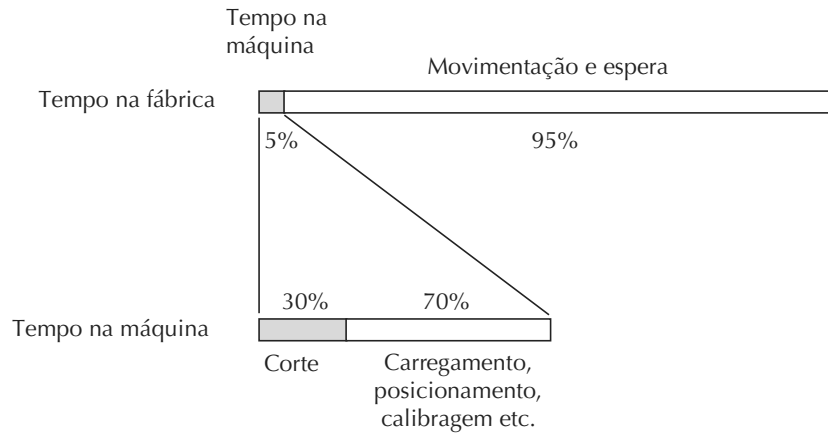
método tradicional importante nessa categoria. Outras técnicas de montagem mecânica para criação de uma conexão permanente incluem *rebites*, *cravamento* (*press fitting*) e *encaixe por expansão*. Na eletrônica são utilizados métodos especiais de montagem. Alguns deles são idênticos às técnicas descritas ou apenas adaptações das mesmas. Por exemplo, a soldagem é largamente utilizada na montagem eletrônica. Esse tipo de montagem preocupa-se primeiramente com a montagem de componentes (ou seja, dos circuitos integrados) para as placas de circuito impresso usadas na produção de circuitos complexos presentes em muitos dos produtos atuais.

2.2.2 Outras operações em uma fábrica

Outras atividades que devem ser executadas na fábrica incluem armazenagem e manuseio de materiais, inspeção e testes e coordenação e controle.

Armazenagem e manuseio de materiais. Em geral, é necessário que exista um meio para movimentação e armazenamento de materiais entre as operações de processamento e/ou montagem. Na maioria das fábricas, os materiais passam mais tempo sendo movimentados e armazenados do que sendo processados. Em alguns casos, a maior parte dos custos do trabalho na fábrica é oriunda de manuseio, movimentação e armazenamento de materiais. É importante que esta função seja executada da maneira mais eficiente possível. Na Parte III deste livro, discutimos as tecnologias para manuseio e armazenagem de materiais utilizadas nas operações de fábrica.

Eugene Merchant, defensor e promotor da indústria de máquinas-ferramenta por muitos anos, observou que os materiais mais comuns nas fábricas de produção em lote ou naquelas de produção por encomenda passam mais tempo em estado de espera ou movimentação do que sendo processados [4]; sua observação é demonstrada na Figura 2.4. Cerca de 95 por cento do tempo de uma peça são gastos na movimentação ou na espera (armazenamento temporário). Somente 5 por cento de seu tempo são gastos na máquina-ferramenta. Desse último percentual, menos de 30 por cento do tempo gasto na máquina (1,5 por cento do tempo total da peça) são dedicados ao corte. Os 70 por cento restantes (3,5 por cento do total) são gastos em carregamento e descarregamento, manuseio e posicionamento da peça, posicionamento da ferramenta, calibragem e outros elementos que não fazem parte do tempo de processamento. Essas frações de tempo sinalizam a importância da armazenagem e do manuseio de materiais em uma fábrica convencional.

Figura 2.4 Como o tempo é gasto na fabricação de uma peça em uma fábrica de produção em lote [4]

Inspeção e testes. Essas são atividades de controle. O objetivo da inspeção é determinar se o produto fabricado está em conformidade com padrões e especificações do projeto. A inspeção examina, por exemplo, se as atuais dimensões de uma peça mecânica estão dentro da tolerância indicada em seu desenho de engenharia. Os testes normalmente se preocupam com as especificações funcionais do produto final, e não com as peças individuais que o compõem. O teste final do produto, por exemplo, garante que ele funcione e opere no modo especificado pelo projetista. Na Parte V deste livro, examinamos as atividades de inspeção e testes.

Coordenação e controle. Na produção, essas atividades incluem tanto a regulamentação do processamento individual como as operações de montagem e o gerenciamento das atividades da fábrica. No nível do processo, o controle envolve o alcance de certos objetivos de desempenho por meio da manipulação correta das entradas e de outros parâmetros do processo. Esse aspecto é discutido na Parte II deste livro.

No nível da fábrica, o controle engloba uso efetivo da mão de obra, manutenção de equipamentos, movimentação de materiais na fábrica, controle de estoque, entrega de produtos de boa qualidade conforme agendamento e manutenção dos custos de operação da fábrica em um nível mínimo. Nesse nível, a função de controle da produção representa o principal ponto de interseção entre as operações físicas da fábrica e as atividades de processamento de informações que acontecem na produção. Muitas dessas funções de controle no nível da fábrica e no nível do empreendimento são discutidas nas partes V e VI (esta última está disponível no Companion Website) deste livro.

2.3 INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO

Uma empresa de produção tenta organizar suas instalações da maneira mais eficiente para cumprir a missão

particular de cada fábrica. Ao longo dos anos, certos tipos de instalações de produção passaram a ser reconhecidos como a maneira mais apropriada de organizar o ambiente para determinado tipo de produção. É claro que um dos fatores mais importantes na determinação do tipo de produção é o produto a ser feito. Conforme mencionado anteriormente, este livro preocupa-se primeiramente com a produção de peças discretas e produtos. A quantidade de peças e/ou produtos feitos por uma fábrica exerce influência significativa sobre as instalações e sobre o modo como a produção está organizada. O *volume produzido* refere-se ao número de unidade de determinada peça ou produto que é produzida anualmente pela fábrica. Ele pode ser classificado em três faixas:

1. *Produção baixa:* quantidades na faixa de 1 a 100 unidades.
2. *Produção média:* quantidades na faixa de 100 a 10 mil unidades.
3. *Produção alta:* quantidades na faixa de 10 mil a milhões de unidades.

As fronteiras entre as faixas são um tanto arbitrárias (segundo julgamento do autor) e podem variar dependendo dos tipos de produtos.

Algumas fábricas produzem variedades de tipos de produtos, cada um sendo produzido em quantidade baixa ou média. Outras se especializam na produção de grandes quantidades de somente um tipo de produto. Vale a pena identificar a variedade de produtos para que sirva como parâmetro diferente da quantidade produzida. A *variedade do produto* refere-se aos diferentes projetos ou tipos de produtos em uma fábrica. Diferentes produtos têm diferentes formas, tamanhos e modelos, executam funções diferentes, podem ser direcionados a mercados distintos, possuem uma quantidade diferente de componentes etc. O número de tipos diferentes de

produtos produzidos a cada ano pode ser contabilizado. Quando esse número é alto, tem-se uma grande variedade de produtos.

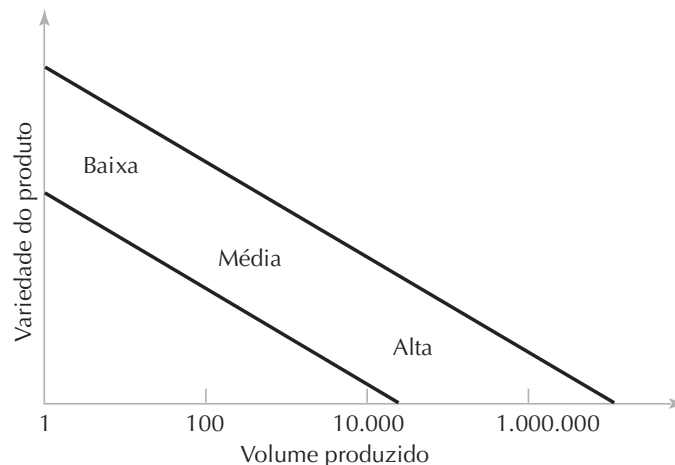
Em termos de operações de fábrica, existe uma correlação inversa entre a variedade do produto e o volume produzido. Quando a variedade do produto é alta, o volume produzido tende a ser baixo e vice-versa. Essa relação é apresentada na Figura 2.5. As fábricas costumam se especializar em uma combinação de variedade de produtos e volume produzido que se posicione em algum ponto dentro da faixa diagonal mostrada na Figura 2.5. Em geral, uma determinada fábrica tende a limitar-se ao valor da variedade do produto correlacionado ao volume produzido.

Embora tenhamos identificado a variedade de produtos como parâmetro quantitativo (a quantidade de tipos diferentes de produtos produzidos por uma fábrica ou empresa), esse valor é muito menos exato do que o volume produzido, pois os detalhes sobre o quão diferentes são os projetos não podem ser capturados simplesmente a partir do número de projetos diferentes. As diferenças entre um automóvel e um aparelho de ar-condicionado são muito maiores do que entre um ar-condicionado e um aquecedor. Os produtos podem ser diferentes, mas a extensão das diferenças pode ser muita ou pouca. O setor automotivo oferece alguns exemplos que ilustram esse ponto. Cada uma das montadoras norte-

-americanas produz carros com duas ou três identificações distintas na mesma fábrica, embora os modelos e as outras características de projeto sejam praticamente os mesmos. Em fábricas diferentes, a mesma empresa produz caminhões pesados. Vamos empregar os termos ‘intensa’ e ‘leve’ para descrever essas diferenças na variedade do produto. A *variedade intensa do produto* acontece quando os produtos diferem substancialmente. Em um produto montado, a variedade intensa é caracterizada por uma baixa proporção de peças comuns entre os produtos — em muitos casos não há sequer peças em comum. A diferença entre um carro e um caminhão é grande, caracterizando uma variedade intensa entre esses produtos. A *variedade leve do produto* ocorre quando existem diferenças pequenas entre os produtos, tais como as diferenças entre os modelos de carro montados na mesma linha de produção. Quando a variedade é leve, existe uma alta proporção de peças comuns entre os produtos montados. A variedade entre diferentes categorias de produtos tende a ser intensa; enquanto entre diferentes modelos do mesmo produto tende a ser leve.

Podemos usar três faixas de volume produzido para identificar categorias básicas de plantas de produção. Embora existam variações na organização do trabalho em cada uma das categorias — em geral, dependendo da variedade do produto —, essa ainda é uma maneira de classificar as fábricas para fins de apresentação.

Figura 2.5 Relação entre a variedade do produto e o volume produzido na fabricação de produtos discretos



2.3.1 Produção baixa

O tipo de instalação normalmente associado à faixa de quantidade de uma a cem unidades por ano é a *unidade de produção por encomenda*, que produz baixas quantidades de produtos especializados e personalizados. Os produtos normalmente são complexos, tais como cápsulas espaciais, aeronaves e máquinas especiais. A produção por

encomenda também pode incluir a fabricação das peças componentes do produto. Para esses tipos de itens, as encomendas dos clientes costumam ser especiais e a repetição do pedido pode não acontecer nunca. Na produção por encomenda, os equipamentos são de propósito geral e a mão de obra é altamente qualificada.

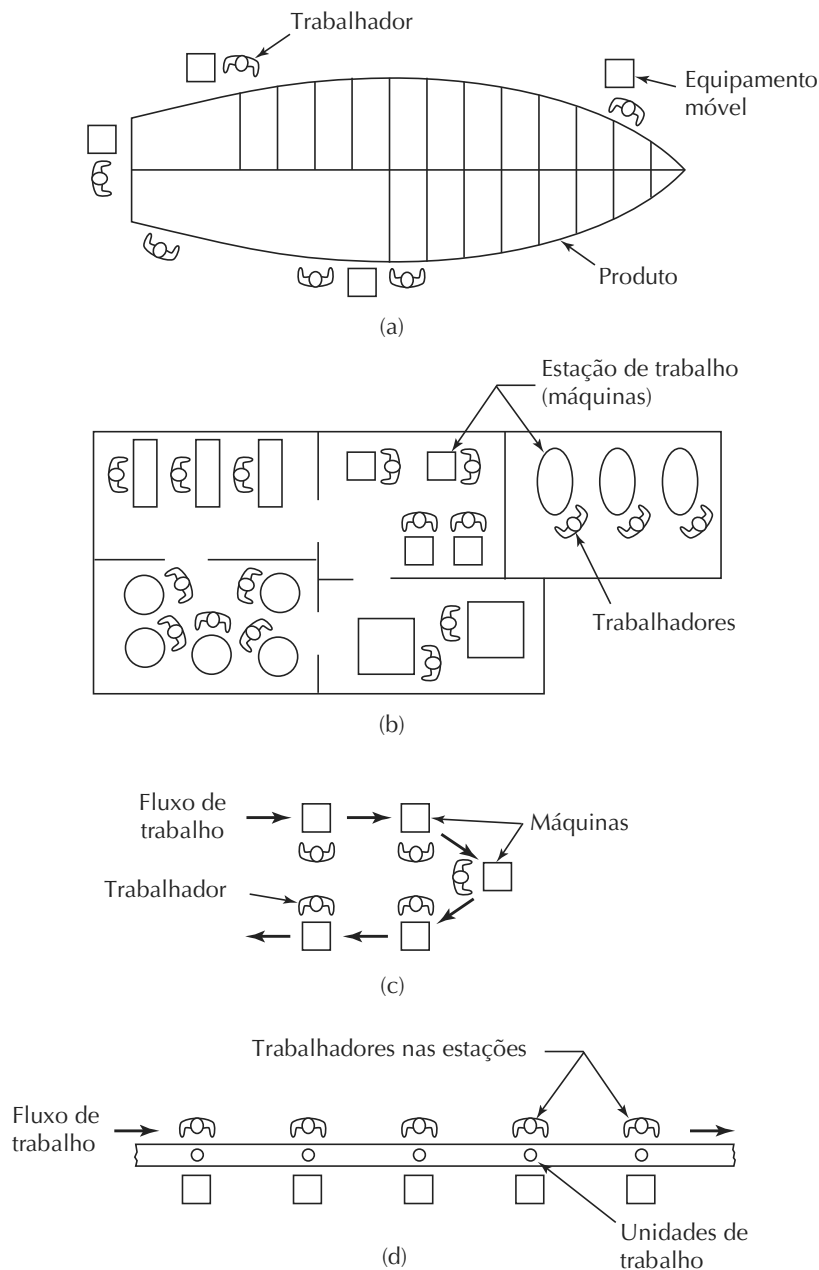
Uma unidade de produção por encomenda deve estar organizada de modo a oferecer a maior flexibilidade possí-

vel para a variedade de peças e produtos encontrada (variedade intensa de produtos). Se o produto for grande e pesado e, portanto, difícil de ser movimentado pela fábrica, ele costuma ficar em um único local ao menos durante a montagem final. Ao contrário de se levar o produto ao equipamento, os trabalhadores e o equipamento de processamento são levados até o produto. Esse tipo de organização é denominado *layout de posição fixa*, conforme mostra a Figura 2.6(a); nele o produto permanece em uma única posição durante toda sua fabricação. Exemplos desse tipo de produto incluem navios, aeronaves, locomotivas férreas e máquinas pesadas. Na prática atual, esses itens costumam ser montados em grandes módulos em uma mesma

localidade e, então, os módulos completos são agrupados na montagem final com a ajuda de guindastes de grande capacidade.

As peças individuais que compõem esses grandes produtos costumam ser feitas em fábricas organizadas conforme o *layout por processo*, no qual o equipamento é disposto de acordo com a função ou tipo. Os tornos estão em um departamento, as fresadoras estão em outro departamento etc., conforme mostra a Figura 2.6(b). Peças diferentes, cada uma com uma sequência de operação específica, trafegam pelos departamentos na ordem particular necessária ao processamento, normalmente realizado em lotes. O *layout por processos* é elogiado por sua

Figura 2.6 Vários tipos de organização de fábrica: (a) *layout de posição fixa*; (b) *layout por processo*; (c) *layout celular*, (d) *layout por produto*



flexibilidade, já que pode acomodar grande variedade de sequências alternativas de operação para diferentes configurações de peças. Sua desvantagem está no fato de as máquinas e os métodos para a produção da peça não serem adequados à alta eficiência. É necessário muito manuseio de material para movimentar as peças entre os departamentos e, portanto, o estoque de material em processo costuma ser grande.

2.3.2 Produção média

Na faixa de quantidade média (100 a 10 mil unidades por ano), existem dois tipos distintos de instalações, dependendo da variedade do produto. Quando a variedade é intensa, a abordagem tradicional é a da *produção em lote*, na qual, após a conclusão de um lote de determinado produto, as instalações são alteradas de modo a produzir um lote do próximo produto etc. É comum que se repitam as encomendas de produto. A taxa de produção do equipamento é maior do que a taxa da demanda por qualquer tipo individual de produto e, portanto, o equipamento pode ser compartilhado entre múltiplos produtos. A troca de configurações entre as produções leva tempo. Denominado *tempo de configuração* ou *tempo de preparação (setup time)*, esse período é destinado à troca de ferramentas e à configuração ou reprogramação das máquinas. Uma desvantagem na produção em lote é esse tempo de produção perdido. A produção em lote é normalmente utilizada nas situações de produção para estoque, na qual os itens são produzidos para reabastecer o estoque que foi gradativamente esgotado a partir da demanda. Para a produção em lote, o equipamento costuma estar disposto conforme o *layout* por processo mostrado na Figura 2.6(b).

É possível utilizar uma abordagem alternativa para a faixa de produção média quando a variedade do produto é leve. Nesse caso, pode ser que não seja necessário muito tempo de preparo entre a produção de um modelo de produto e outro. É sempre possível configurar o equipamento de modo que grupos de peças ou produtos semelhantes sejam produzidos no mesmo equipamento sem perda significativa de tempo para as trocas. O procedimento de processamento ou montagem de peças ou produtos diferentes é realizado em células compostas por diversas estações de trabalho e máquinas. O termo *manufatura celular* é comumente associado a esse tipo de produção. Cada célula é destinada à produção de uma variedade limitada de configurações de peças; ou seja, a célula se especializa na produção de determinado conjunto de peças ou produtos semelhantes, segundo o princípio da *tecnologia de grupo* (Capítulo 18). A organização é denominada *layout celular*, conforme mostra a Figura 2.6(c).

2.3.3 Produção alta

A faixa de alta quantidade (10 mil a milhões de unidades por ano) é frequentemente denominada *produção em massa*. A situação é caracterizada por uma alta taxa de demanda pelo produto, e a instalação da produção é dedicada à sua fabricação. Existem duas categorias de produção em massa: (1) produção em quantidade e (2) linha de fluxo de produção. A *produção em quantidade* envolve a produção em massa de peças individuais em equipamentos individuais. O método de produção normalmente envolve máquinas-padrão (tais como as prensas de estampagem) equipadas com ferramentas especiais (como moldes e dispositivos de manuseio de materiais) que acabam ficando dedicadas à produção de um tipo de peça. Na produção em quantidade, a organização física típica é a do *layout* por processo, mostrado na Figura 2.6(b).

A *linha de fluxo de produção* envolve múltiplas estações de trabalho dispostas em sequência e, para concluir o produto, peças ou montagens são movidas fisicamente através da sequência. As estações de trabalho são compostas de máquinas de produção e/ou trabalhadores equipados com ferramentas especializadas. A coleção de estações é destinada especificamente ao produto de modo a maximizar a eficiência. A organização física é denominada *layout por produto*, e as estações de trabalho são distribuídas em uma longa linha, conforme mostra a Figura 2.6(d), ou em série de segmentos de linha conectados. O trabalho costuma ser movido entre as estações por um transporte motorizado. Em cada estação, um pequeno montante do trabalho total é concluído sobre cada unidade do produto.

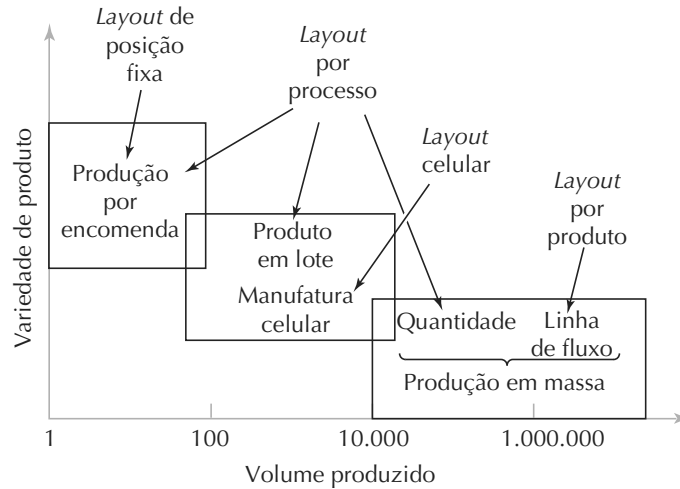
O exemplo mais familiar da linha de fluxo de produção é a linha de montagem, associada a produtos como carros e eletrodomésticos. O caso da linha de fluxo de produção pura é aquele no qual não existem variações de produtos produzidos na linha. Os produtos são idênticos e a linha é tratada como uma *linha de produção de um modelo*. Entretanto, para uma comercialização bem-sucedida de um produto, é sempre necessário introduzir variações dos modelos para que os consumidores individuais possam escolher o modelo exato e as opções que mais lhes agradam. Do ponto de vista da produção, as diferenças nos modelos representam um caso de variedade do produto leve. O termo *linha de produção mista* se aplica àquelas situações nas quais a variedade do produto na linha é leve. A montagem de automóveis moderna é um exemplo. Os carros que saem da linha de montagem apresentam variações nos opcionais e na carroceria, representando modelos diferentes (e, em muitos casos, modelos diferentes) do mesmo projeto básico de veículo. Outros exemplos incluem utensílios pequenos e grandes. A Boeing Commercial Airplanes

Company emprega técnicas de linha de produção na montagem do modelo 737.

Grande parte da nossa discussão sobre os tipos de instalações de produção está resumida na Figura 2.7, que

detalha a Figura 2.5 por meio da identificação dos tipos de instalações de produção e dos *layouts* de fábrica utilizados. Conforme mostra a figura, existe certa sobreposição entre os diferentes tipos de instalações.

Figura 2.7 Tipos de instalação e *layouts* utilizados para diferentes níveis de quantidade produzida e variedade de produto



2.4 RELAÇÃO PRODUTO/PRODUÇÃO

Conforme observado na seção anterior, as empresas organizam as instalações da produção e os sistemas de manufatura da maneira mais eficiente segundo os produtos que fabricam. É importante reconhecer que existem certos parâmetros de produto que são essenciais na determinação de como são feitos. Vamos considerar os seguintes parâmetros: (1) volume produzido; (2) variedade do produto; (3) complexidade de produtos (montados); e (4) complexidade das partes.

2.4.1 Quantidade produzida e variedade do produto

Na Seção 2.3, discutimos o volume produzido e a variedade do produto. Vamos agora desenvolver um conjunto de símbolos para representar esses importantes parâmetros. Considere que Q é o volume produzido e P , a variedade do produto. Podemos, assim, discutir a relação entre o volume produzido e a variedade do produto como relações PQ .

Q se refere ao número de unidade de uma peça ou de um produto feito anualmente por uma fábrica. Nosso interesse inclui tanto a quantidade individual de cada produto ou peça como a quantidade total de todos os modelos. Vamos identificar o modelo do produto ou peça utilizando o subscrito j de modo que Q_j é igual à quantidade anual do modelo j . Considere que Q_f é a quantidade total de todas as partes ou produtos produzi-

dos pela fábrica (o subscrito f refere-se à fábrica). Q_j e Q_f são relacionados como

$$Q_f = \sum_{j=1}^P Q_j \quad (2.1)$$

em que P é o número total de modelos diferentes de peças ou produtos, e j é o subscrito para identificar os produtos – $j = 1, 2, \dots, P$.

P refere-se aos projetos diferentes de produtos ou tipos produzidos na fábrica. É um parâmetro que pode ser contado, no entanto, reconhecemos que as diferenças entre os produtos podem ser grandes ou pequenas. Na Seção 2.3, fizemos a distinção entre as variedades dos produtos intensa e leve. A variedade intensa ocorre quando os produtos diferem substancialmente. A variedade leve acontece quando as diferenças entre os produtos são pequenas. Vamos dividir o parâmetro P em dois níveis, como uma estrutura em árvore. Vamos chamá-los de P_1 e P_2 . P_1 refere-se ao número de linhas de produto distintas produzidas pela fábrica, e P_2 refere-se ao número de modelos em uma linha de produtos. P_1 representa uma variedade de produtos intensa, e P_2 representa uma variedade leve. O número total de modelos de produtos é dado por

$$P = \sum_{j=1}^{P_1} P_{2j} \quad (2.2)$$

em que o subscrito j identifica a linha de produtos: $j = 1, 2, \dots, P_1$.

EXEMPLO 2.1**Linhas e modelos de produtos**

Uma empresa se especializa em produtos de entretenimento doméstico. Ela produz somente televisores e sistemas de som. Assim $P_1 = 2$. Sua linha de televisores oferece 15 modelos diferentes, enquanto sua linha de sistemas de som oferece 5. Assim sendo, $P_2 = 15$ para os televisores e, para os sistemas de som, $P_2 = 5$. A totalidade de modelos de produtos oferecidos é dada pela Equação 2.2:

$$P = \sum_{j=1}^2 P_{2j} = 15 + 5 = 20$$

2.4.2 Complexidade do produto e da peça

O quão complexo é cada produto produzido na fábrica? A complexidade do produto é uma questão complicada, pois tem tanto aspectos qualitativos como quantitativos. Vamos tentar abordá-la utilizando medidas quantitativas. Para um produto montado, um indicador possível da *complexidade do produto* é o número de componentes — quanto mais peças, mais complexo o produto. Isso é facilmente demonstrado por meio da comparação do número de peças em diferentes produtos montados, conforme apresentado na Tabela 2.4. Nossa lista demonstra que quanto mais componentes tiver o produto, mais complexo ele tende a ser.

Para um componente fabricado, uma medida possível para a *complexidade da peça* é o número de etapas de processamento necessárias a sua produção. Um circuito integrado, que tecnicamente é um *chip* monolítico de silício com alterações localizadas na química de sua superfície, demanda centenas de etapas de processamento em sua fabricação. Embora possa medir somente 12 mm de largura e 0,5 mm de espessura, sua complexidade é maior do que a de uma arruela com 12 mm de diâmetro externo,

moldada em aço inoxidável com 0,8 mm de espessura em apenas uma etapa. Na Tabela 2.5, compilamos uma lista de peças produzidas com o número típico de operações de processamento para cada uma delas.

Portanto, temos a complexidade de um produto montado definido como o número de componentes distintos. Consideremos que n_p é igual ao número de peças por produto. Temos ainda que a complexidade do processamento de cada peça é o número de operações necessárias em sua produção. Consideramos que n_o é igual ao número de operações ou etapas de processamento para fazer uma peça. Podemos verificar algumas diferenças entre as fábricas a partir de n_p e n_o . Conforme definido na Tabela 2.6, três tipos diferentes de fábrica podem ser identificados: produtoras de peças, fábricas de montagem pura e fábricas verticalmente integradas.

Vamos desenvolver algumas relações simples entre P , Q , n_p e n_o que indicam o nível de atividade em uma fábrica. Vamos ignorar as diferenças entre P_1 e P_2 , embora a Equação 2.2 possa ser utilizada para converter esses parâmetros no valor P correspondente. O número total de produtos produzidos anualmente na fábrica é a soma das quantidades dos projetos individuais de produtos, conforme mostrado na Equação 2.1. Considerando que todos os produtos são montados e que todas as peças utilizadas nesses produtos são feitas na fábrica (ou seja, nenhum componente é comprado), então o número total de partes produzidas por ano na fábrica é dado por

$$n_{pf} = \sum_{j=1}^P Q_j n_{pj} \quad (2.3)$$

em que n_{pf} é o número total de peças produzidas na fábrica (peças/ano), Q_j é a quantidade anual de produtos do modelo j (produtos/ano), e n_{pj} é o número de peças no produto j (peças/produto).

Tabela 2.4 Número típico de componentes separados em diversos produtos montados (compilados a partir de [1], [3] e outras fontes)

Produto (data aproximada)	Número aproximado de componentes
Lapiseira (moderna)	10
Rolamento de esferas (moderno)	20
Rifle (1800)	50
Máquina de costura (1875)	150
Correia de bicicleta (moderna)	300
Bicicleta (moderna)	750
Automóvel antigo (1910)	2.000
Automóvel (moderno)	20.000
Aeronave comercial (1930)	100.000
Aeronave comercial (moderna)	1.000.000
Ônibus espacial (moderno)	10.000.000

Tabela 2.5 Número típico de operações de processamento demandado na fabricação de diferentes peças

Peça	Nº aproximado de operações de processamento	Operações de processamento típicas empregadas
Parte moldada em plástico	1	Moldagem por injeção
Arruela (aço inoxidável)	1	Estampagem
Arruela (aço galvanizado)	2	Estampagem, galvanoplastia
Peça forjada	3	Aquecimento, forjamento, aparação
Eixo de bomba	10	Usinagem (de barra rígida)
Ferramenta de corte em carboneto revestido	15	Prensagem, sinterização, revestimento, moagem
Bomba hidráulica, usinada	20	Moldagem, usinagem
Bloco de motor V6	50	Moldagem, usinagem
Chip de circuito integrado	75	Fotolitografia, diversos processos térmicos e químicos

Tabela 2.6 Fábricas de produção diferenciadas pelos valores n_p e n_o

$n_o > 1$	Produtor de peças. A fábrica produz componentes individuais e cada componente demanda múltiplas etapas de processamento. Não há montagem, portanto, $n_p = 1$.	Fábrica verticalmente integrada. A fábrica produz peças e as utiliza na montagem do produto final. Assim sendo, $n_o > 1$; $n_p > 1$.
$n_o = 1$	Fábrica artesanal. Não chega a ser uma fábrica. Fabrica uma peça por ano; portanto, $n_o = 1$, $n_p = 1$.	Fábricas de montagem. Uma fábrica de montagem pura não produz peças. Ela compra de fornecedores. É necessária uma operação para montagem da peça no produto, portanto $n_o = 1$.
	$n_p = 1$	$n_p > 1$

Por fim, se todas as peças são produzidas na fábrica, o número total de operações de processo executadas pela fábrica é dado por

$$n_{of} = \sum_{j=1}^P Q_j n_{pj} \sum_{k=1}^{n_{pj}} n_{ojk} \quad (2.4)$$

em que n_{of} é o número total de ciclos de operações executadas pela fábrica (operações/ano), e n_{ojk} é o número de operações de processamento para cada peça k , somada ao número de peças no produto j , n_{pj} . O parâmetro n_{of} retorna um valor numérico para o nível total de atividade na fábrica.

Podemos tentar simplificar essa equação de modo a conceituar a situação por meio da utilização de valores médios para os quatro parâmetros P , Q , n_p e n_o . Na verdade, estamos assumindo que os projetos de produtos P são feitos nas mesmas quantidades Q , que todos os produtos possuem o mesmo número de componentes n_p e que todos os componentes demandam um número igual de etapas de

processamento n_p . Nesse caso, o número total de unidade do produto produzidas pela fábrica é dado por

$$Q_f = PQ \quad (2.5)$$

O número total de peças produzidas pela fábrica é dado por

$$n_{pf} = PQ n_p \quad (2.6)$$

O número total de operações de produção executadas pela fábrica é dado por

$$n_{of} = PQ n_p n_o \quad (2.7)$$

Utilizando as equações simplificadas, considere o exemplo a seguir.

EXEMPLO 2.2

Sistema de produção — um problema

Suponha que uma empresa projetou uma nova linha de produtos e está planejando construir uma nova fábrica para produção dessa linha. A nova linha é composta por

100 tipos diferentes de produtos e, para cada um deles, a empresa quer produzir 10 mil unidades anualmente. A média de componentes por produtos é igual a mil, e o número médio de operações de processamento necessárias para cada componente é igual a 10. Todas as peças serão produzidas na fábrica. Cada etapa de processamento leva, em média, um minuto. Determine (a) quantos produtos, (b) quantas peças, (c) quantas operações de produção serão necessárias a cada ano e (d) quantos trabalhadores serão necessários na fábrica se ela operar em turnos de oito horas durante 250 dias/ano?

Solução:

(a) O número total de unidade a ser produzido pela fábrica é dado por

$$Q = PQ = 100 \times 10.000 = 1.000.000 \text{ produtos/ano.}$$

(b) O número total de peças produzidas é

$$n_{pi} = PQn_p = 1.000.000 \times 1.000 = 1.000.000.000 \text{ de peças/ano.}$$

(c) O número de operações de produção distintas é

$$n_{oi} = PQn_p n_o = 1.000.000.000 \times 10 = 10.000.000.000 \text{ de operações}$$

(d) Primeiro, considere o tempo total gasto na execução dessas operações. Se cada operação levar um minuto (1/60 h),

$$\text{Tempo total} = 10.000.000.000 \times 1/60 = 166.666.667 \text{ h}$$

Se cada trabalhador trabalhar 2.000 h/ano (250 dias/ano \times 8 h/dia), então o número total de trabalhadores necessários é

$$w = \frac{166.666.667}{2.000} = 83.333 \text{ trabalhadores.}$$

A fábrica do exemplo é totalmente integrada. Seria uma grande fábrica. O número de trabalhadores calculado inclui somente a mão de obra direta. Acrescente a mão de obra indireta e o pessoal administrativo e gerencial, e o número sobe para além de 100 mil trabalhadores. Imagine o estacionamento. Dentro da fábrica, os problemas de logística no gerenciamento de todos os produtos, peças e operações seriam esmagadores. Atualmente, nenhuma organização ajuizada consideraria a construção ou o funcionamento de uma fábrica dessas — nem mesmo o governo federal.

2.4.3 Limitações e capacidades da planta de produção

As empresas não se arriscam com fábricas como a do exemplo. Em vez disso, as fábricas atuais são projetadas com missões específicas. Denominadas *fábricas focadas*, são plantas que se concentram na produção “de um con-

junto limitado, conciso e gerenciável de produtos, tecnologias, volumes e mercados” [5]. É o reconhecimento de que uma planta de produção não pode fazer tudo; ela deve limitar sua missão a determinado escopo de produtos e atividades nas quais pode competir melhor. Seu tamanho inclui cerca de 500 trabalhadores, ou menos, embora o número varie para tipos diferentes de produtos e operações de produção.

Vamos considerar de que forma uma fábrica, ou sua matriz, limita seu escopo de operações e sistemas de produção. Na limitação de seu escopo, a fábrica toma uma série de decisões deliberadas com relação ao que não vai tentar fazer. Certamente uma das formas de limitar o escopo da fábrica é evitar tornar-se totalmente integrada, ao menos conforme a extensão da fábrica do Exemplo 2.2. Em vez disso, a fábrica se especializa em ser ou uma produtora de peças ou uma fábrica de montagem. Assim que decide o que não fará, a fábrica deve também decidir sobre as tecnologias, os produtos e os volumes específicos nos quais se especializará. Essas decisões determinam a intenção de capacidade de produção da fábrica. A *capacidade de produção* refere-se às limitações físicas e técnicas da empresa de produção e cada uma de suas fábricas. Podemos identificar diversas dimensões dessa capacidade: (1) capacidade de processamento tecnológico; (2) tamanho físico e peso do produto; e (3) capacidade de produção.

Capacidade de processamento tecnológico. A capacidade de processamento tecnológico de uma fábrica (ou empresa) refere-se ao conjunto de processos de produção disponíveis. Algumas fábricas realizam operações de máquinas, outras transformam tarugos de aço em materiais laminados, enquanto outras produzem automóveis. Uma oficina mecânica não lida com tarugos, e um laminador não fabrica carros. A característica que distingue essas fábricas é o conjunto de processos que elas podem executar. A capacidade de processamento tecnológico está fortemente relacionada ao material processado. Alguns processos de produção são destinados a determinados materiais, enquanto outros processos são destinados a outros. Especializando-se em um processo ou em um grupo de processos, a fábrica está simultaneamente especializando-se em determinado tipo de material ou em alguns tipos específicos de materiais.

A capacidade de processamento tecnológico inclui não só os processos físicos, mas também o conhecimento do pessoal da fábrica sobre essas tecnologias de processamento. As empresas são limitadas pelos processos disponíveis. Elas devem focar no projeto e na produção de produtos para os quais a capacidade de processamento tecnológico oferece vantagem competitiva.

Limitações físicas do produto. Um segundo aspecto da capacidade de produção é imposto pelo produto físico. Dada uma fábrica com determinado conjunto de processos, existem limitações de tamanho e peso sobre os produtos que podem ser acomodados na fábrica. É difícil movimentar produtos grandes e pesados. Para movê-los, a fábrica deve estar equipada com guindastes com capacidade para cargas grandes. Peças e produtos menores produzidos em grandes quantidades podem ser movimentados com um transporte ou uma empilhadeira. A limitação com relação ao tamanho e peso do produto também se estende à capacidade física do equipamento de produção. As máquinas têm tamanhos diferentes. Máquinas maiores podem ser usadas no processamento de peças maiores. Máquinas menores limitam o tamanho do trabalho passível de processamento. Equipamentos de produção, manuseio de materiais, capacidade de armazenamento e tamanho da fábrica devem ser planejados para os produtos dentro de determinada faixa de tamanho e peso.

Capacidade de produção. Uma terceira limitação na capacidade de produção de uma fábrica é a quantidade que pode ser produzida em determinado período de tempo (por exemplo, meses ou anos). A capacidade de produção é definida como a taxa máxima de produção por período que uma fábrica consegue alcançar sob determinadas condições de operação. Essas condições referem-se a número de turnos por semana, horas por turno, níveis de lotação de trabalho direto na fábrica e condições semelhantes sob as quais a fábrica foi projetada para operar. Esses fatores representam insumos para a fábrica. Dados esses insumos, quanto é possível produzir?

A capacidade da fábrica costuma ser medida em termos de unidades produzidas, tais como toneladas anuais de aço produzidas por uma siderúrgica ou o número de carros produzidos por uma fábrica de montagem final. Nesses casos, os produtos são mais ou menos homogêneos. Nos casos em que as unidades produzidas não são homogêneas, outros fatores podem ser considerados medidas mais apropriadas, tais como o número de horas de trabalho disponíveis da capacidade de produção em uma oficina mecânica que produz variedades de peças.

2.5 PRODUÇÃO ENXUTA

Hoje em dia, as empresas de produção e suas fábricas devem operar de modo eficiente e eficaz para continuar competitivas na economia global. Nesse sentido, uma das abordagens gerais bem-sucedidas é a produção enxuta. Dado o seu amplo uso nas operações de produção, nesta seção oferecemos uma breve descrição dessa abordagem.

Produção enxuta significa que a fábrica operará com o mínimo de recursos possível e, ainda assim, maximizará o volume de trabalho realizado com esses recursos, os quais incluem trabalhadores, equipamentos, tempo, espaço e materiais. Produção enxuta também implica a conclusão dos produtos no menor tempo possível e o alcance de um nível bastante alto de qualidade de modo que o consumidor esteja completamente satisfeito. Em resumo, a produção enxuta significa fazer mais com menos, e fazer melhor.

Em geral, as operações de produção incluem muitas atividades que não passam de desperdício, ou seja, que não agregam valor ao produto, tal como produzir peças defeituosas ou mais peças do que o necessário, manusear materiais desnecessariamente e deixar os trabalhadores esperando. As atividades de produção podem ser divididas em três categorias, segundo o valor que agregam à peça ou ao produto produzido:

1. *Atividades de agregação de valor.* São as atividades de trabalho que agregam valor real à unidade de trabalho. Incluem operações de processamento e montagem que alteram a peça ou o produto de modo que o consumidor possa reconhecer e apreciar.
2. *Atividades auxiliares.* São aquelas que apoiam as atividades de agregação de valor, mas não contribuem para o valor da peça ou do produto. São necessárias porque, sem elas, as atividades de agregação de valor não podem ser concluídas. Atividades auxiliares incluem carregamento e descarregamento de uma máquina que executa processos de agregação de valor.
3. *Atividades desnecessárias.* São aquelas que nem agregam valor ao produto nem apoiam as atividades de agregação de valor. Se não fossem realizadas, o produto não sofreria efeito colateral.

A produção enxuta trabalha na eliminação de atividades inúteis de modo que sejam executadas somente atividades auxiliares e de agregação de valor. Quando isso é feito, significa que menos recursos são necessários, o trabalho é concluído em menos tempo e uma qualidade mais alta é alcançada no final. Alguns dos programas associados à produção enxuta são os seguintes:

- *Entrega de produtos just-in-time.* Refere-se ao modo como as peças são movimentadas pelo sistema de produção quando uma sequência de operações de produção é necessária. No sistema *just-in-time* ideal, cada parte é entregue à estação de trabalho seguinte logo antes que a peça seja necessária na estação. A disciplina minimiza o volume de material em processo entre as estações, o que gera um alto nível de qualidade nas peças produzidas.
- *Envolvimento do trabalhador.* Em um ambiente enxuto, os trabalhadores recebem responsabilidades maiores e são treinados de forma a tornarem-se flexíveis nos trabalhos que podem executar. Além disso, participam da solu-

ção de problemas enfrentados pela empresa em equipes de trabalho. A filosofia subjacente é oposta à divisão da carga de trabalho total em diferentes classificações de tarefas e à criação de regras que proíbem os trabalhadores de realizar tarefas fora das classificações de seu cargo.

- *Melhoria contínua.* Envolve uma busca contínua por maneiras de implementar melhorias nos produtos e nas operações de produção. Costuma ser alcançada por equipes de trabalho que cooperam no desenvolvimento de soluções para os problemas de qualidade e de produção.
- *Tempos de preparo reduzidos.* A engenharia de métodos é utilizada para minimizar o tempo necessário à troca entre uma configuração e outra na produção em lote. Isso permite que os lotes sejam menores, o que reduz o volume de trabalho em processo na fábrica.
- *Interrupção do processo quando algo dá errado.* As máquinas de produção são projetadas para parar automaticamente quando uma peça defeituosa é produzida, quando a quantidade solicitada foi alcançada ou

quando alguma operação anormal é detectada. Isso aumenta a qualidade da peça e evita a superprodução.

- *Prevenção de erros.* Refere-se ao uso, em cada estação de trabalho, de dispositivos de baixo custo e características de projeto que previnem a ocorrência de erros. Os erros comuns na produção incluem a omissão de etapas de processamento ou montagem, a localização incorreta de uma peça no procedimento de fixação e o uso da ferramenta inadequada.
- *Manutenção produtiva total (total productive maintenance — MPT ou TPM).* É um programa que inclui a manutenção preventiva e outros procedimentos para evitar que quebras de máquinas atrapalhem operações de produção. Uma característica central do programa é fazer com que o trabalhador na máquina execute pequenos reparos e procedimentos de manutenção.

Uma listagem mais completa dos programas no sistema de produção enxuta é dada no Capítulo 26 (disponível no Companion Website).

Referências

- [1] BLACK, J. T. *The design of the factory with a future*, New York, NY: McGraw-Hill, 1991.
- [2] GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern manufacturing: Materials, processes, and systems*. 3. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007.
- [3] HOUNSHELL, D. A. *From the American system to mass production, 1800-1932*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press, 1984.
- [4] MERCHANT, M. E. “The inexorable push for automated production”. *Production Engineering*, p. 45-46, jan. 1977.
- [5] SKINNER, W. “The focused factory”. *Harvard Business Review*, p. 113-121, maio-jun. 1974.

Questões de revisão

- 2.1 O que é produção?
- 2.2 Quais são as três categorias básicas de setor?
- 2.3 Qual a diferença entre bens de consumo e bens de capital?
- 2.4 Qual a diferença entre uma operação de processamento e uma operação de montagem?
- 2.5 Com base no estado do material de trabalho inicial, cite as quatro categorias de operações de moldagem.
- 2.6 As operações de montagem podem ser classificadas como processos de junção permanente ou montagem mecânica. Quais são os quatro tipos de métodos de junção permanente?
- 2.7 Qual a diferença entre a variedade de produto intensa e a leve?
- 2.8 Que tipo de produção uma unidade de produção por encomenda realiza?
- 2.9 A linha de fluxo de produção está associada a qual dos seguintes tipos de *layout*: (a) *layout* de posição fixa, (b) *layout* por processo, (c) *layout* celular ou (d) *layout* por produto?
- 2.10 Qual a diferença entre uma linha de produção de um modelo e uma linha de produção mista?
- 2.11 O que se entende por *capacidade de processamento tecnológico*?
- 2.12 O que é produção enxuta?
- 2.13 Na produção enxuta, o que é a entrega de peças *just-in-time*?
- 2.14 Na produção enxuta, o que o envolvimento do trabalhador representa?
- 2.15 Na produção enxuta, o que significa a melhoria contínua e como costuma ser alcançada?

Problemas

- 2.1 Uma fábrica produz três linhas de produto: A, B e C. Existem seis modelos na linha A, quatro na linha B e oito na linha C. O volume anual médio produzido para cada modelo na linha A é de 500 unidades; na linha B, 700 unidades; e, na linha C, 1.100 unidades. Determine os valores de (a) P e (b) Q para essa fábrica.
- 2.2 A empresa ABC está planejando uma nova linha de produtos e irá construir uma nova fábrica para produzir as peças dessa linha, que inclui 50 modelos distintos. Espera-se que o volume anual médio de cada produto seja de mil unidades. A montagem de cada produto requer 400 componentes. O processamento completo de todas as peças será realizado em uma fábrica. Uma média de seis etapas são necessárias na produção de cada componente, e cada etapa de processamento dura um minuto (incluindo o tempo de configuração e de manuseio da peça). Todas as operações de processamento são executadas em estações de trabalho, cada uma com uma máquina de produção e um trabalhador. Se cada estação de trabalho requer um espaço físico de 250 pés quadrados e se a fábrica opera em um turno (2.000 h/ano), determine (a) quantas operações de produção, (b) qual espaço físico e (c) quantos trabalhadores serão necessários na fábrica.
- 2.3 A empresa XYZ planeja introduzir uma nova linha de produtos e construirá uma nova fábrica para produzir as peças e montar os produtos finais da nova linha, a qual inclui cem modelos diferentes. Espera-se que a produção média anual de cada produto seja de mil unidades. A montagem de cada produto requer 600 componentes. O processamento completo de todas as peças e a montagem dos produtos serão realizadas em uma fábrica. Uma média de dez etapas são necessárias na produção de cada componente, e cada etapa de processamento dura 30 segundos (incluindo o tempo de configuração e de manuseio da peça). A montagem de cada unidade final do produto leva três horas. Todas as operações de processamento são executadas em células de trabalho que incluem uma máquina de produção e um trabalhador. Os produtos são montados em estações de trabalho individuais, com dois trabalhadores cada. Se cada célula de trabalho e cada estação de trabalho requerem um espaço físico de 200 pés quadrados, e se a fábrica opera em um turno (2.000 h/ano), determine (a) quantas operações de produção, (b) qual espaço físico e (c) quantos trabalhadores serão necessários na fábrica.
- 2.4 Se a empresa do Problema 2.3 operasse em três turnos (6.000 h/ano), e não somente em um, quais seriam as respostas para (a), (b) e (c)?