

Estudos de casos: seleção de processos



Peças de alumínio fundidas em molde. (Imagem por cortesia de Aluminum Recovery Technologies Kendallville, Indiana.)

SUMÁRIO

14.1	Introdução e sinopse	380
14.2	Fundição de uma biela de alumínio	380
14.3	Conformação de uma ventoinha	383
14.4	Isoladores para velas de ignição	392
14.5	Um coletor de admissão	394
14.6	União de um radiador de aço	396
14.7	Endurecimento da superfície da pista de um rolamento de esferas	397
14.8	Resumo e conclusões	399

14.1 INTRODUÇÃO E SINOPSE

O capítulo anterior descreveu um procedimento sistemático para seleção de processos. Os insumos são requisitos de projeto; o resultado é uma lista curta de processos que podem cumprir esses requisitos. Quando há competição entre processos, um modelo de custo pode classificá-los. Os estudos de casos neste capítulo ilustram o método. Os quatro primeiros utilizam diagramas em papel; os dois últimos mostram como funciona a seleção por computador.

Os estudos de casos seguem um padrão fixo. Em primeiro lugar, organizamos uma lista de *requisitos de projeto*: material, forma, tamanho, seção mínima, precisão e acabamento. Então passamos esses requisitos para matrizes de processos, que identificam áreas de busca. Os processos que se encontram dentro das áreas de busca são capazes de fazer o componente conforme sua especificação de projeto: são os candidatos. Se nenhum processo sozinho cumprir todos os requisitos de projeto, então é preciso “empilhar” processos: fundição seguida por usinagem (para cumprir a especificação de tolerância para uma superfície, por exemplo); ou métodos de pó seguidos por retificação.

Então procuramos mais detalhes para o mais promissor, começando pelas fontes de dados apresentados sob o título *Leitura adicional* e na compilação mais abrangente do Apêndice D. A escolha final evolui desse subconjunto, levando em conta fatores locais, muitas vezes específicos de determinada empresa, área geográfica ou país.

14.2 FUNDIÇÃO DE UMA BIELA DE ALUMÍNIO

Bielas ligam movimento oscilatório a movimento rotativo em motores de combustão interna, e movimento rotativo a movimento oscilatório em bombas. Aqui estudamos processos concorrentes para fundir uma pequena biela de liga de alumínio (Figura 14.1), usando o modelo de custo do Capítulo 13 para distinguir entre eles.

Os requisitos de projeto A biela é uma forma sólida tridimensional a ser feita de uma liga não ferrosa. As dimensões da biela são tais que sua massa é aproximadamente 0,3 kg e sua seção mínima é 8 mm. A precisão e a tolerância da peça fundida não são críticas, visto que os furos e suas faces terão de ser usinados para dar a precisão exigida. O tamanho de lote pretendido é 100.000. A Tabela 14.1 resume os requisitos.

A seleção As restrições estão representadas em matrizes e diagramas de processos nas Figuras 14.4 a 14.10 deste capítulo. O material, a forma e o tamanho do lote requerido eliminam a maioria dos processos apresentados neles, sobrando como opções três processos de fundição e usinagem de sólidos. A usinagem é rejeitada por questão de desperdício de material; restam fundição em areia, fundição em molde e fundição a baixa pressão (Tabela 14.2).

Uma ideia melhor é dada pelo exame dos custos relativos de cada processo, usando o modelo da Equação (13.6). Os dados relevantes estão reunidos na Tabela 14.3, na qual todos os custos estão normalizados pelo

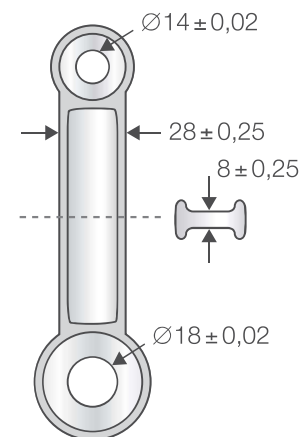


FIGURA 14.1

Uma biela. A precisão dos furos e dos faceamentos dos furos é muito mais alta do que a do restante do corpo, exigindo usinagem subsequente.

Tabela 14.1 Requisitos para a biela

Função	Biela	
Restrições	Material: liga de alumínio para fundição	} – Restrições técnicas } – Restrições de qualidade } – Restrição econômica
	Forma: sólida, 3D	
	Massa estimada: 0,3–0,4 kg	
	Seção mínima: 8 mm	
	Tolerância: < 1,0 mm (superfícies), < 0,02 mm (furos)	
	Rugosidade: não crítica	
	Tamanho do lote: 100.000	
Objetivo	Minimizar custo	
Variáveis livres	Escolha de processo	
	Condições de operação do processo	

Tabela 14.2 Lista curta para conformação da biela

Processo	Comentário
Fundição em areia mais usinagem	O diagrama processo-tolerância, Figura 14.8, revela que nenhum desses pode cumprir o requisito de tolerância para o furo. Todos precisarão de uma operação de usinagem subsequente.
Fundição a baixa pressão	
Fundição em molde	

custo do material, o termo $mC_m/(1-f)$. Os resultados estão representados no gráfico da Figura 14.2 como custo unitário C versus curvas n de tamanho de lote, seguindo o exemplo da Figura 13.33. Em tamanhos de lote pequenos, o custo unitário é dominado pelos custos “fixos” de ferramentas (o segundo termo do lado direito da Equação (13.6)). À medida que o tamanho do lote, n , aumenta, essa contribuição cai (desde que, claro, o ferramental tenha vida útil maior do que n) até se horizontalizar a um valor que é dominado pelos custos “variáveis” do material, mão de obra e outras despesas gerais indiretas.

Processos concorrentes normalmente têm custos de ferramental C_t e taxa de produção \dot{n} diferentes, e por isso suas curvas $C-n$ se interceptam, como ocorre aqui. O equipamento de fundição

Tabela 14.3 Dados para a equação de custo para os processos na Tabela 14.2

Custo relativo*	Fundição em areia	Fundição em molde	Fundição a baixa pressão	Comentário
Material, $mC_m/(1-f)$	1	1	1	
Despesas gerais indiretas básicas \dot{C}_{oh} (h^{-1})	10	10	10	Parâmetros independentes do processo
Tempo de baixa contábil do capital t_{wo} (anos)	5	5	5	
Fator de carga	0,5	0,5	0,5	
Custo dedicado de ferramental, C_t	210	16.000	2.000	Parâmetros dependentes do processo
Custo de capital, C_c	1.800	30.000	8.000	
Taxa de produção do lote, \dot{n} (h^{-1})	3	50	10	
Vida útil da ferramenta, n_t (número de unidades)	200.000	1.000.000	500.000	

* Todos os custos normalizados pelo custo do material.

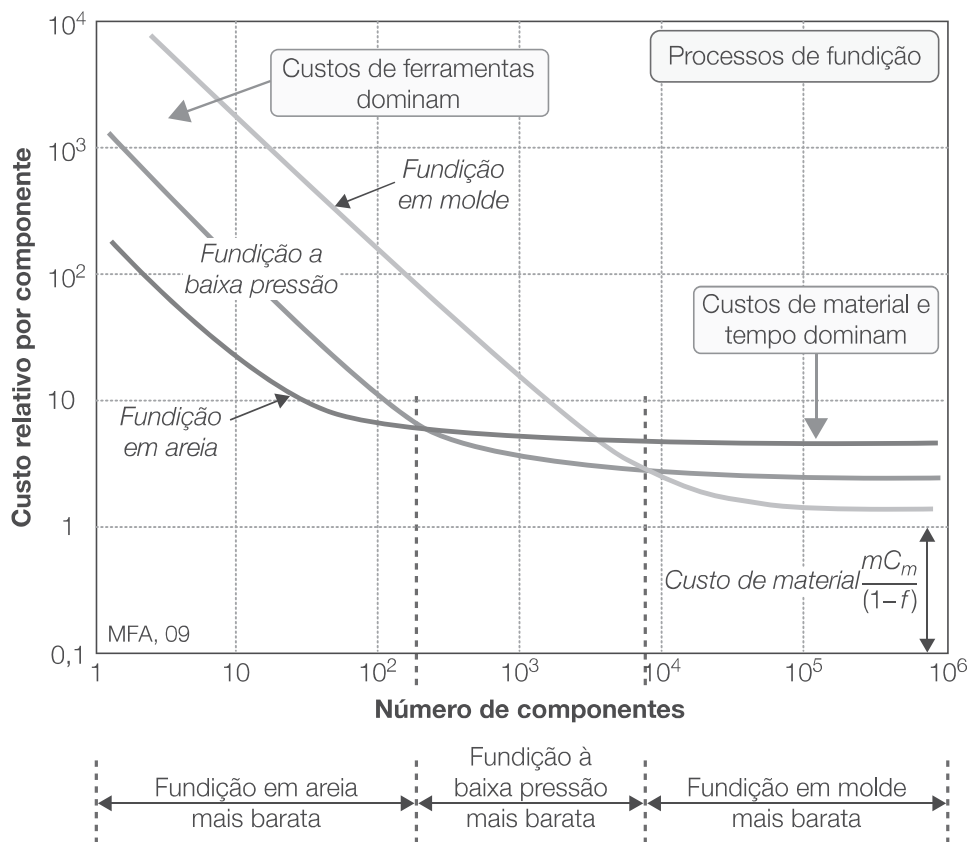


FIGURA 14.2

O custo relativo de fundição da biela em função da corrida de produção. Os custos estão normalizados pelo custo do material.

em areia é barato, porém o processo é lento. O custo de moldes para fundição a baixa pressão é maior do que para fundição em areia, e o processo é um pouco mais rápido. O equipamento de fundição em molde custa muito mais, porém é também muito mais rápido. Consideramos que o custo do material, o custo por hora da mão de obra e o tempo de baixa contábil do capital são os mesmos para todos.

As curvas para fundição em areia, a baixa pressão e em molde se interceptam em um tamanho de lote de 200: abaixo disso, a fundição em areia é a mais econômica. A fundição à baixa pressão torna-se marginalmente mais cara do que as outras para lotes entre 200 e 8.000, acima dos quais a fundição em molde torna-se a escolha mais econômica. A melhor escolha para um tamanho de lote de 100.000 é fundição em molde. Observe que, para pequenos lotes, o custo do componente é dominado pelo das ferramentas – o custo do material mal importa. Porém, à medida que o tamanho do lote cresce, a contribuição do segundo termo na equação do custo diminui; e se o processo é rápido, o custo unitário cai até o valor típico de três vezes o do material do qual o componente é feito.

Observação Há outras questões de qualidade além da precisão e do acabamento que entram na escolha do processo. Peças fundidas em areia tendem a aprisionar bolhas e inclusões que agem como pontos de partida para trincas de fadiga em um componente que suporta carregamento cíclico como uma biela. Algumas técnicas de fundição a baixa pressão suavizam o fluxo

do metal líquido que corre para dentro do molde, reduzindo o conteúdo de defeitos. Fundição em molde usa pressões mais altas e em geral dá a peça fundida de qualidade mais alta de todas. Considerações como essas podem mudar os pontos de permuta econômica, expandindo a faixa do lote econômico do processo que oferece a qualidade mais alta.

14.3 CONFORMAÇÃO DE UMA VENTONINHA

Ventoinhas para aspiradores de pó (Figura 14.3) são projetadas para ser acessíveis, silenciosas e eficientes, provavelmente nessa ordem. A chave para minimizar custos de processo é obter a ventoinha em sua forma final em uma única operação, deixando somente o cubo central para ser usinado de modo a se ajustar ao eixo utilizado. Isso significa a seleção de um único processo que pode cumprir as especificações de precisão e tolerância, evitando a necessidade de usinagem ou acabamento do disco ou das lâminas.

Os requisitos de projeto Náilon é o material de escolha para a ventoinha. A taxa de bombeamento de uma ventoinha é determinada por sua taxa de revolução e por seu tamanho. O projetista calcula a necessidade para uma ventoinha de 60 mm de raio, com 12 lâminas perfiladas com espessura média de 4 mm. O volume de material na ventoinha é, aproximadamente, sua área de superfície vezes sua espessura – aproximadamente 10^{-4} m^3 – o que dá (quando multiplicado pela densidade do náilon, 1.100 kg/m^3) um peso na faixa de 0,1 a 0,15 kg. A ventoinha tem um forma razoavelmente complexa, embora sua alta simetria a simplifique um pouco. Nós a classificamos como sólida tridimensional.

Do ponto de vista do projetista, equilíbrio e acabamento da superfície são o que realmente importa. Essas características (e a geometria) determinam a eficiência de bombeamento da ventoinha e influenciam o ruído que ela faz. O projetista especifica uma tolerância de $\pm 0,5 \text{ mm}$ e uma rugosidade de superfície de $\leq 1 \mu\text{m}$. A corrida de produção planejada é de 10.000 ventoinhas.

Os requisitos de projeto estão resumidos na Tabela 14.4. Quais processos podem cumpri-los?

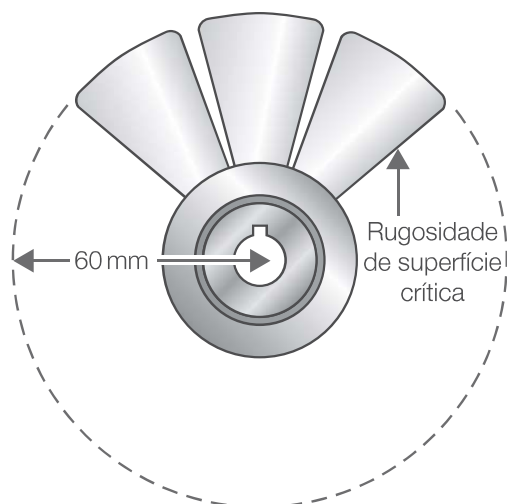


FIGURA 14.3

Uma ventoinha. Deve ser feita de náilon, requer bom acabamento e certa precisão, e deve ser produzida em grandes quantidades.

Tabela 14.4 Requisitos de processo para a ventoinha		
Função	Ventoinha	
Restrições	Material: náilon	} – Restrições técnicas
	Forma: sólida, 3D	
	Massa estimada: 0,1–0,15 kg	
	Seção mínima: 4 mm	} – Restrições de qualidade
	Tolerância: $\pm 0,5$ mm	
	Rugosidade: $< 1 \mu\text{m}$	
	Tamanho do lote: 100.000	} – Restrição econômica
Objetivo	Minimizar custo	
Variáveis livres	Escolha de processo	
	Condições de operação do processo	

A seleção Em primeiro lugar recorreremos às matrizes material-processo e forma-processo (Figuras 14.4 e 14.5) nas quais foram desenhados retângulos de seleção. A interseção das duas figuras deixa cinco classes de processos de conformação – as que estão dentro de retângulos tracejados na segunda figura. Triagem em relação à massa e à espessura da seção (Figuras 14.6 e 14.7) elimina fundição de polímero e RTM, deixando as outras três.

As restrições para tolerância e rugosidade são limites superiores apenas (Figuras 14.8 e 14.9); todas as três classes de processo sobrevivem. O tamanho do lote planejado de 10.000 ventoinhas representado no diagrama de tamanho de lote econômico (Figura 14.10) elimina a usinagem de sólidos. Os processos sobreviventes são apresentados na Tabela 14.5.

Para seguir adiante precisamos do modelo de custo. Os dados requeridos para implementá-lo¹ estão reunidos na Tabela 14.6. A Figura 14.11 mostra as curvas de custo resultantes. As ferramentas para moldagem por compressão são menos caras do que as para moldagem por injeção, porém o processo é mais lento porque, como usa várias cavidades de molde, a moldagem por injeção pode produzir várias unidades de uma vez só. Isso faz com que as duas curvas se interceptem em aproximadamente 10.000 unidades: abaixo, a moldagem por compressão é a menos cara; acima, é a moldagem por injeção.

Observação Há (como sempre) outras considerações – as questões de investimento de capital, capacidades locais, taxa de despesas gerais indiretas e assim por diante. Os diagramas não podem resolvê-las. Porém, o procedimento é útil para estreitar a escolha, sugerindo alternativas e dando uma base de comparação para que uma seleção final possa ser feita.

Estudos de casos relacionados

6.6 “Materiais para volantes”

14.2 “Fundição de uma biela de alumínio”

¹ Dados dos registros existentes no software CES para esses processos.

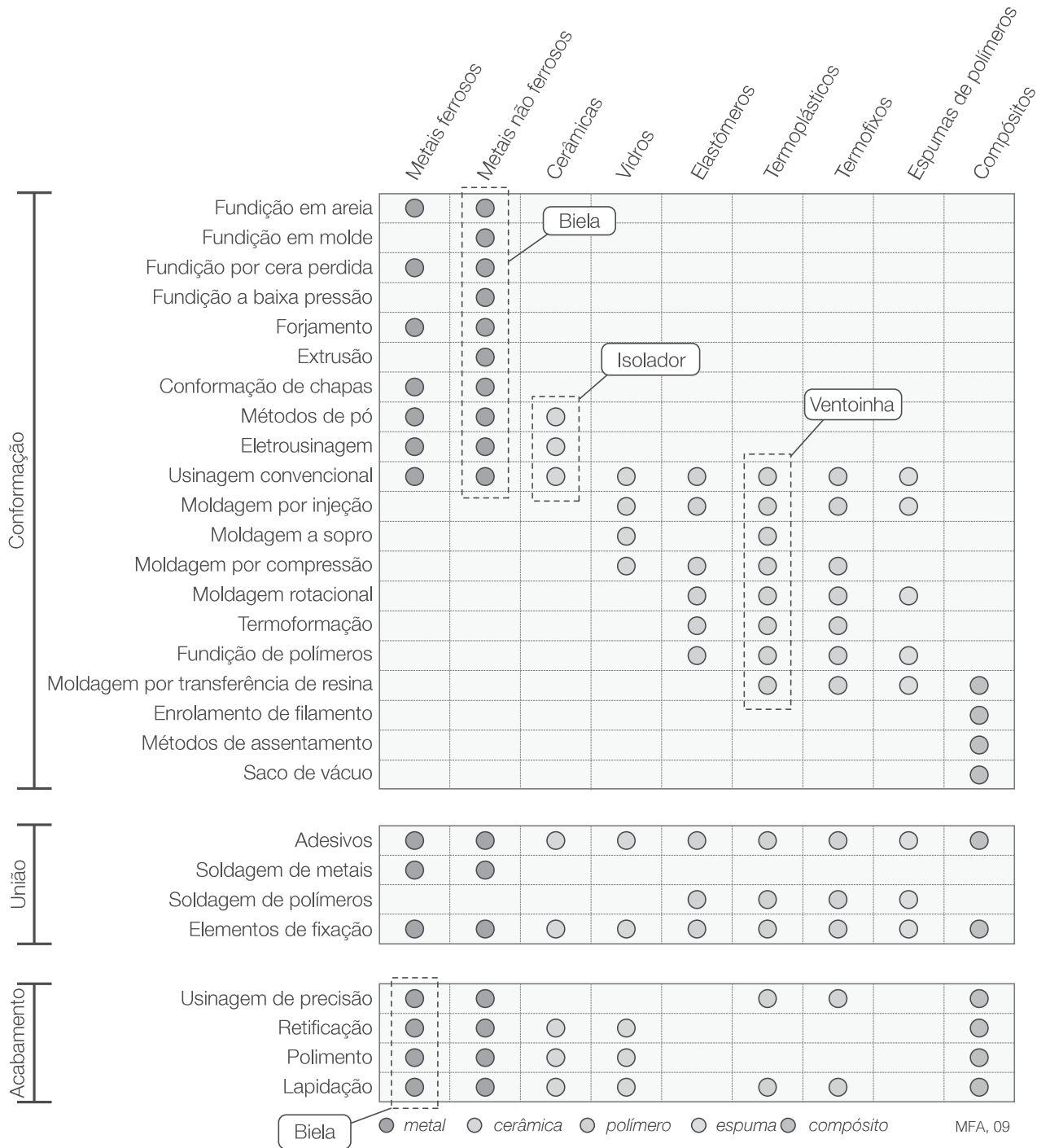


FIGURA 14.4 ◉

A matriz de compatibilidade processo-material, mostrando os requisitos dos estudos de casos. A inclusão de processos de união e acabamento possibilita verificar se os requisitos mais restritivos podem ser cumpridos por combinação de processos.

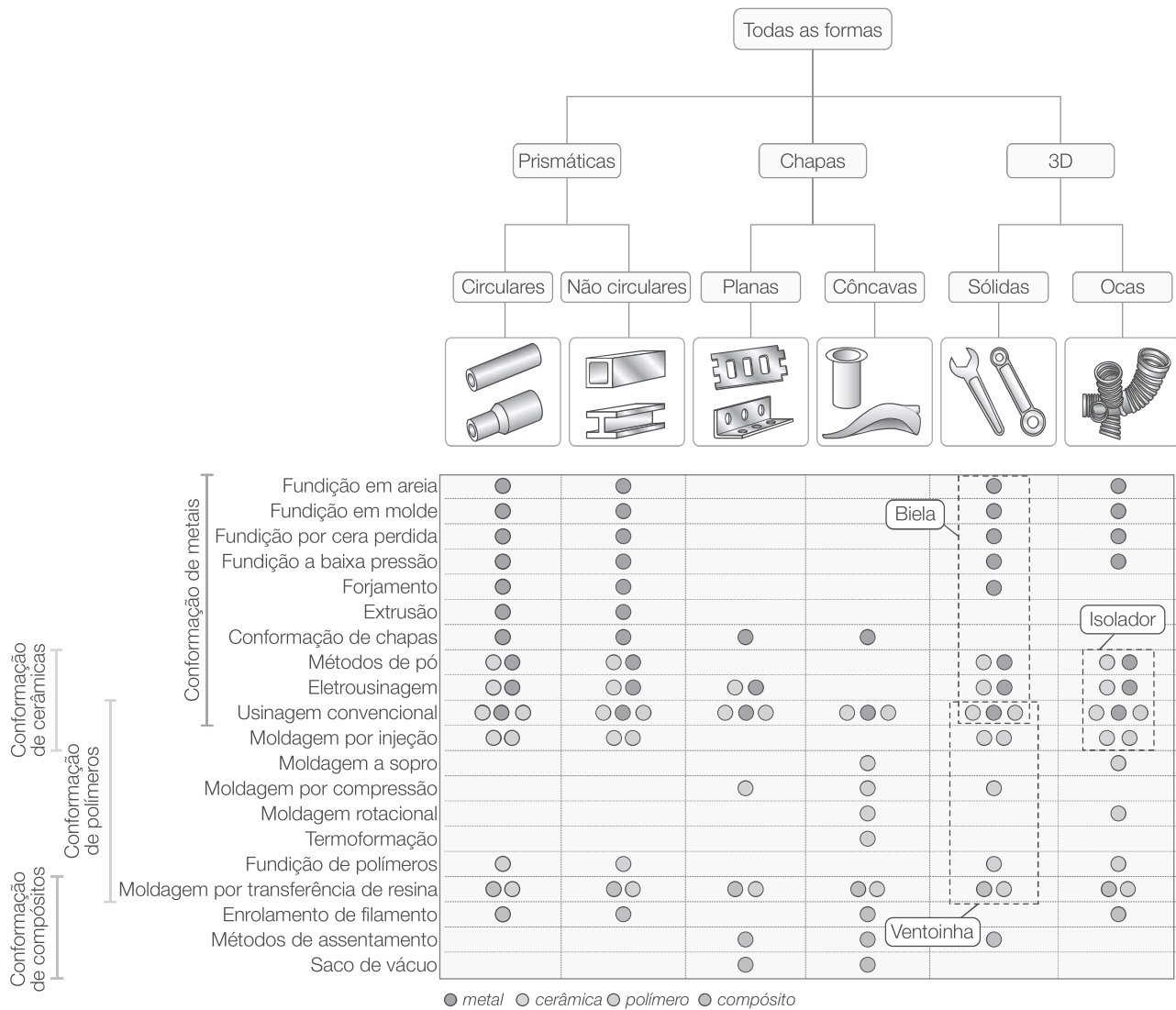


FIGURA 14.5

A matriz de compatibilidade processo-forma, mostrando os requisitos dos estudos de casos. Um resumo da compatibilidade de materiais aparece à esquerda. A interseção entre esse estágio da seleção e o anterior estreita a escolha.

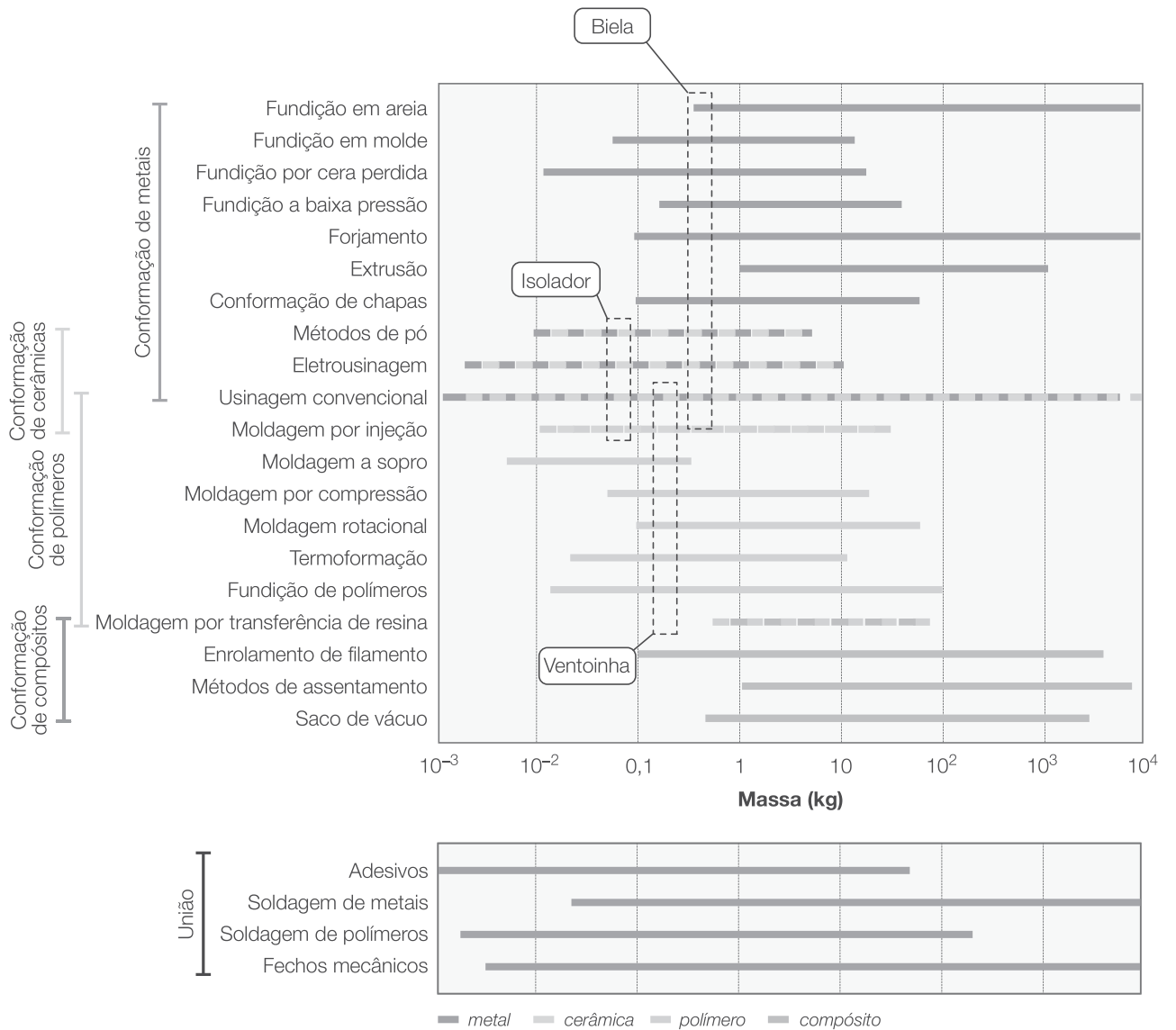


FIGURA 14.6 Ⓞ

O diagrama processo-faixa de massa, mostrando os requisitos dos três estudos de casos. A inclusão de processos de união permite a possibilidade de explorar a fabricação de grandes estruturas.

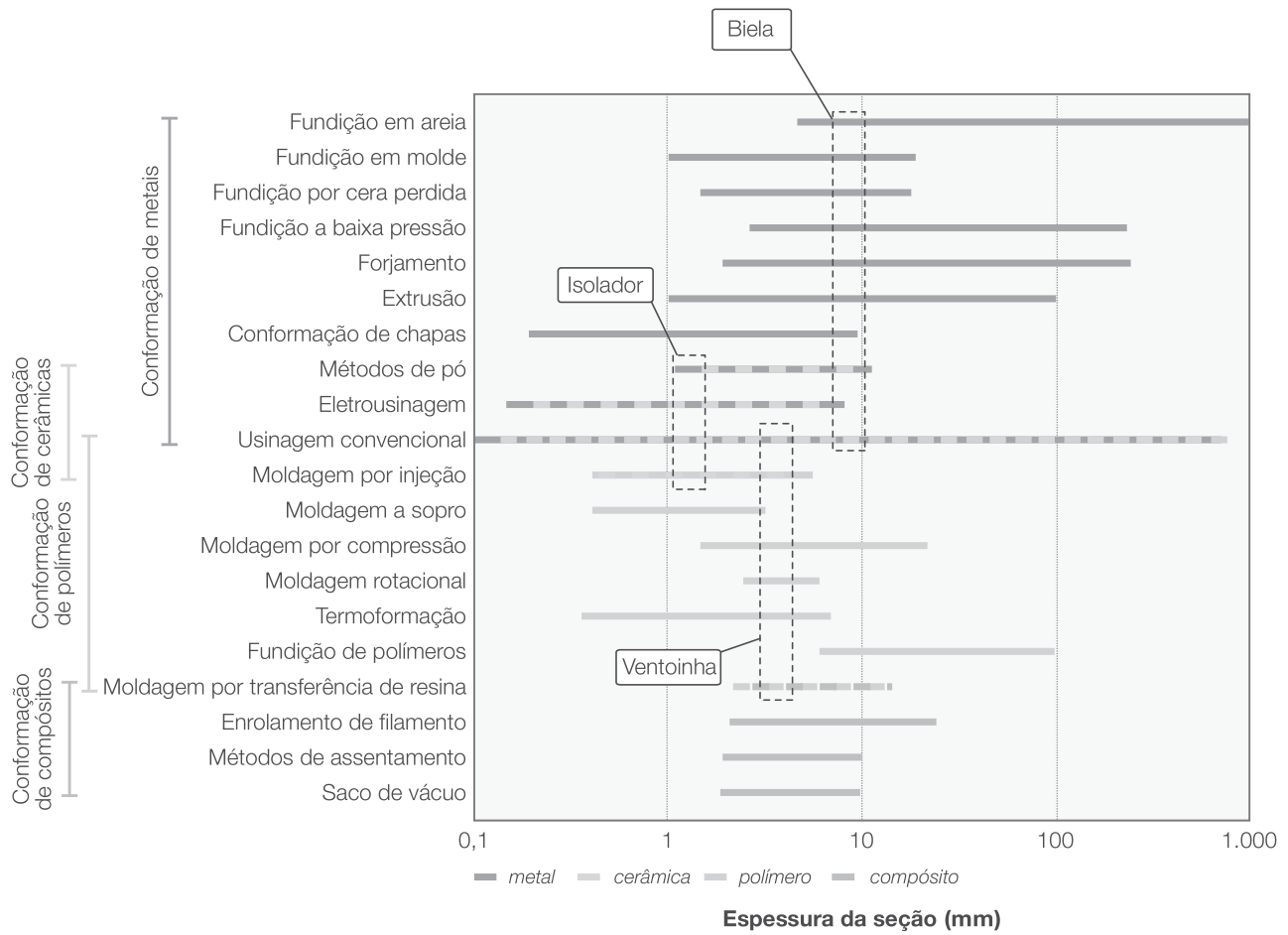


FIGURA 14.7

O diagrama processo-espessura da seção, mostrando os requisitos dos estudos de casos.

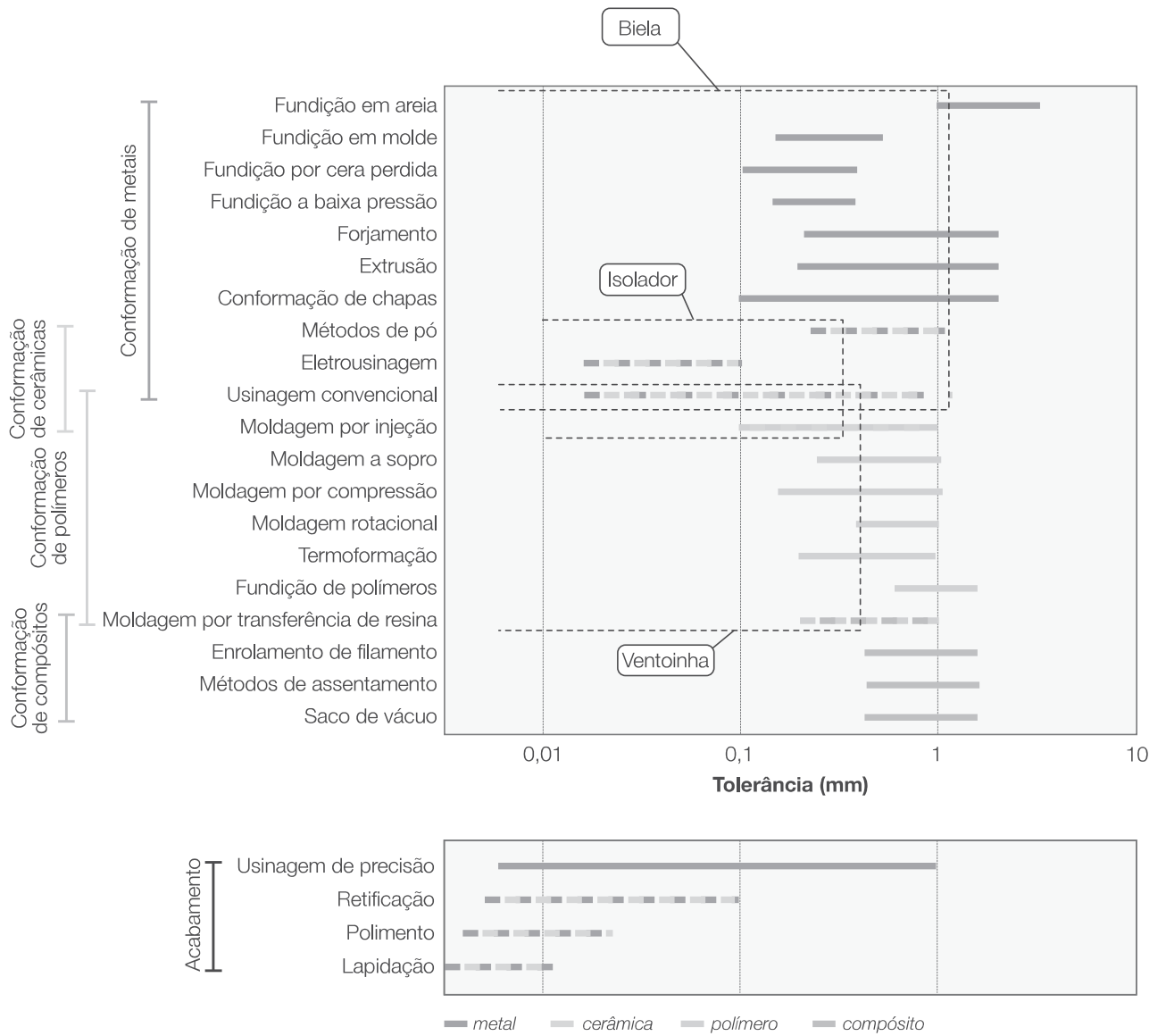


FIGURA 14.8 Ⓞ

O diagrama processo-tolerância, mostrando os requisitos dos estudos de casos. A inclusão de processos de união e acabamento permite a exploração da possibilidade de fabricação de grandes estruturas. Tolerância e rugosidade de superfície são especificadas apenas como limites superiores, portanto os retângulos e seleção (à esquerda) são abertos.

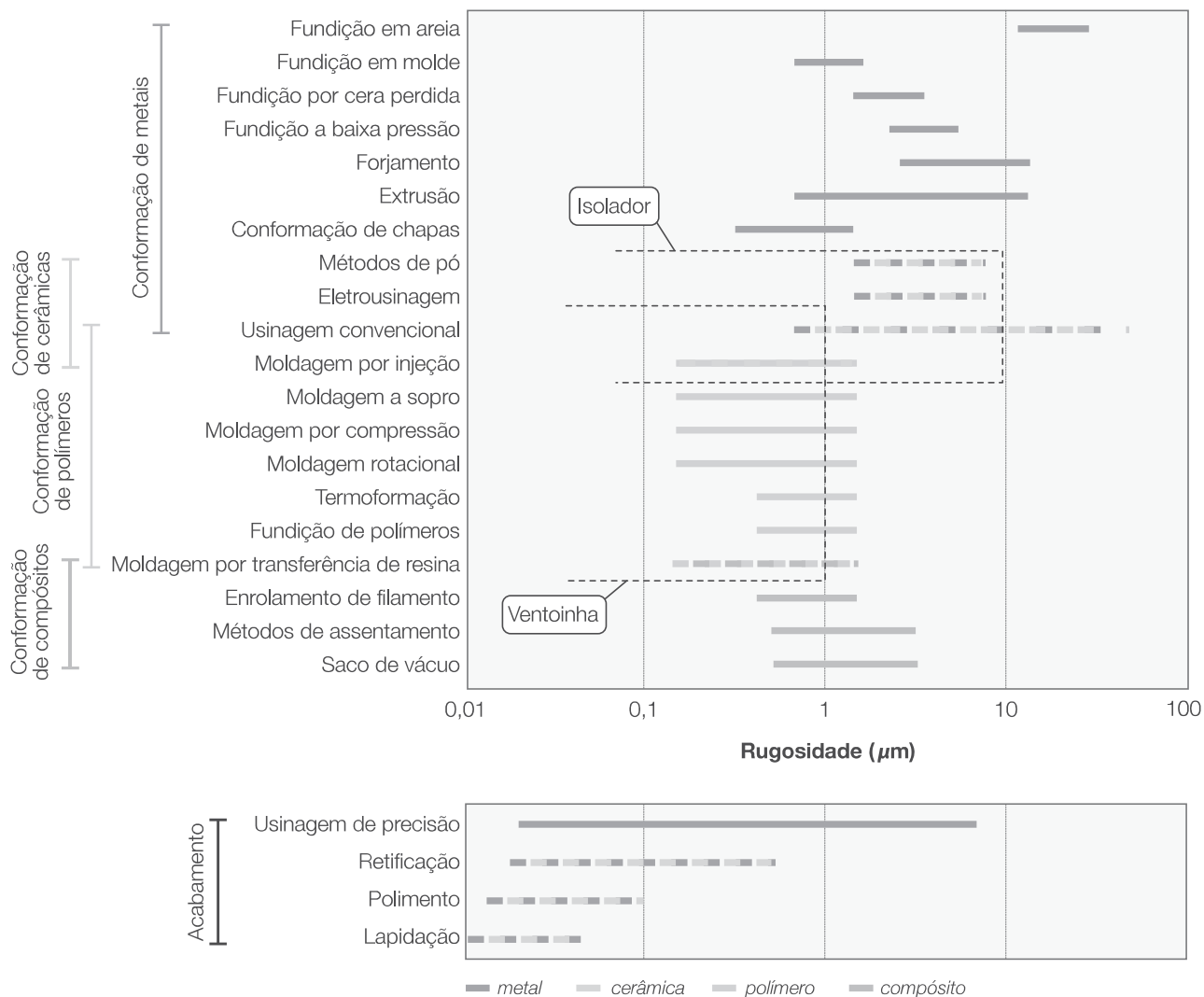


FIGURA 14.9

O diagrama processo-rugosidade da superfície. Somente um estudo de caso – a ventoinha – impõe restrições a isso.

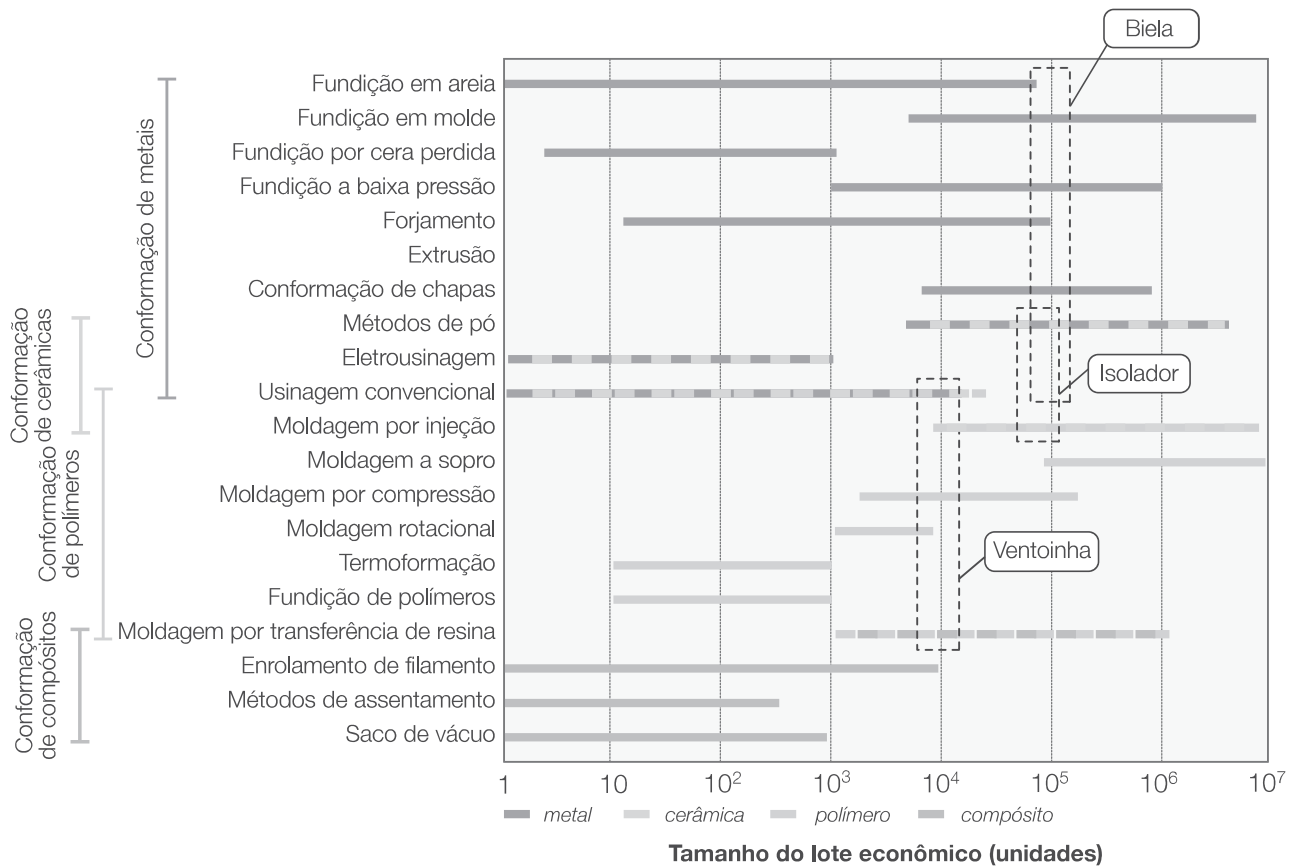


FIGURA 14.10 ◉

O diagrama processo-tamanho do lote econômico, mostrando os requisitos dos três estudos de casos. O retângulo para a tabela ótica abrange a faixa de possíveis volumes de produção citados nos requisitos.

Processo	Comentário
Moldagem por injeção	Moldagem por injeção cumpre todos os requisitos de projeto; moldagem por compressão poderá exigir operações de acabamento adicionais
Moldagem por compressão	

Custo relativo	Moldagem por compressão	Moldagem por injeção	Comentário
Material, $mC_m/(1 - f)$	1	1	<i>Parâmetros independentes de processo</i>
Despesas gerais indiretas básicas \dot{C}_{oh} (h ⁻¹)	20	20	
Tempo de baixa contábil do capital t_{wo} (anos)	5	5	
Fator de carga	0,5	0,5	
Custo dedicado de ferramentas, C_t	2.000	10.000	<i>Parâmetros dependentes de processo</i>
Custo de capital, C_c	20.000	100.000	
Taxa de produção do lote, \dot{n} (h ⁻¹)	30	150	
Vida útil da ferramenta, n_t (número de unidades)	100.000	200.000	

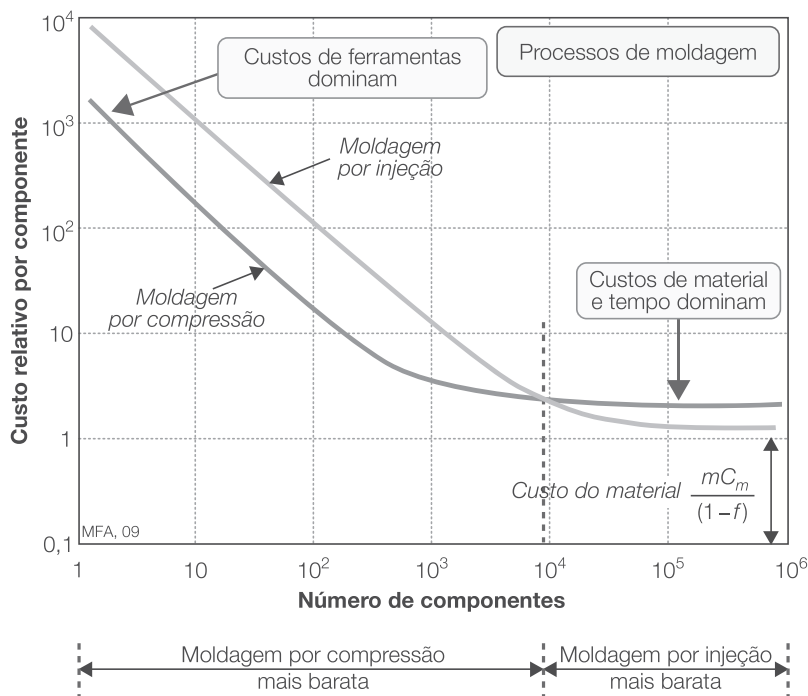


FIGURA 14.11

O custo relativo de moldagem da ventoinha em função da corrida de produção. Os custos estão normalizados pelo custo do material.

14.4 ISOLADORES PARA VELAS DE IGNIÇÃO

Agora as dificuldades de usar diagramas em papel para seleção de processos já serão óbvias: os diagramas têm resolução limitada e são desajeitados para usar. Dão uma visão geral útil, porém não são o modo de obter uma seleção definitiva. Métodos por computador resolvem ambos os problemas.

O sistema CES, que aproveita os métodos do Capítulo 5, já foi descrito. Esse sistema permite a fixação de limites para material, forma, massa, seção, tolerância e rugosidade de superfície, e entrega o subconjunto de processos que respeita todos os limites. Então os aspectos econômicos são examinados mediante a construção de um gráfico de barras do tamanho do lote desejado em relação ao tamanho do lote econômico, ou pela implementação do modelo de custo que acompanha o software. Se os requisitos forem muitos exigentes, nenhum processo individual poderá cumprir todos eles. Então o procedimento é relaxar os mais exigentes deles (frequentemente a tolerância e a rugosidade da superfície) e procurar processos que possam cumprir os outros. Em seguida, procura-se um segundo processo para adicionar o refinamento desejado.

Os dois estudos de casos a seguir mostram como o método funciona.

Os requisitos de projeto A anatomia de uma vela de ignição é mostrada esquematicamente na Figura 14.12. É um conjunto de

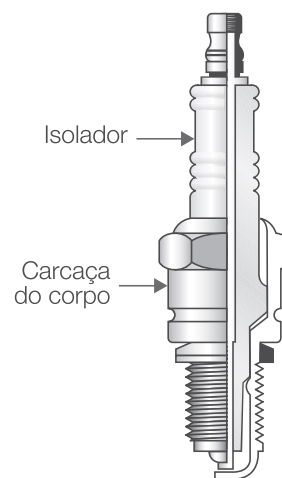


FIGURA 14.12

Uma vela de ignição. Procuramos um processo para fazer o isolador.

componentes, um dos quais é o isolador. Essa peça deve ser feita de uma cerâmica, *alumina*, com a forma mostrada na figura: simétrica em relação ao eixo, oca e escalonada. Pesa aproximadamente 0,05 kg e tem uma seção mínima de 1,2 mm.

A precisão é importante, visto que o isolador é parte de uma montagem; o projeto especifica precisão de $\pm 0,3$ mm e acabamento de superfície melhor do que $10 \mu\text{m}$. Os isoladores serão fabricados em grandes quantidades: o tamanho do lote projetado é 100.000. O custo deve ser o mais baixo possível. A Tabela 14.7 resume os requisitos.

A seleção As restrições estão representadas nas matrizes de compatibilidade e diagramas de barras das Figuras 14.4 a 14.10. Somente uma família de processos sobrevive: métodos de pó. O tamanho do lote requerido, 100.000, encontra-se dentro de sua faixa econômica (consulte a Figura 14.6).

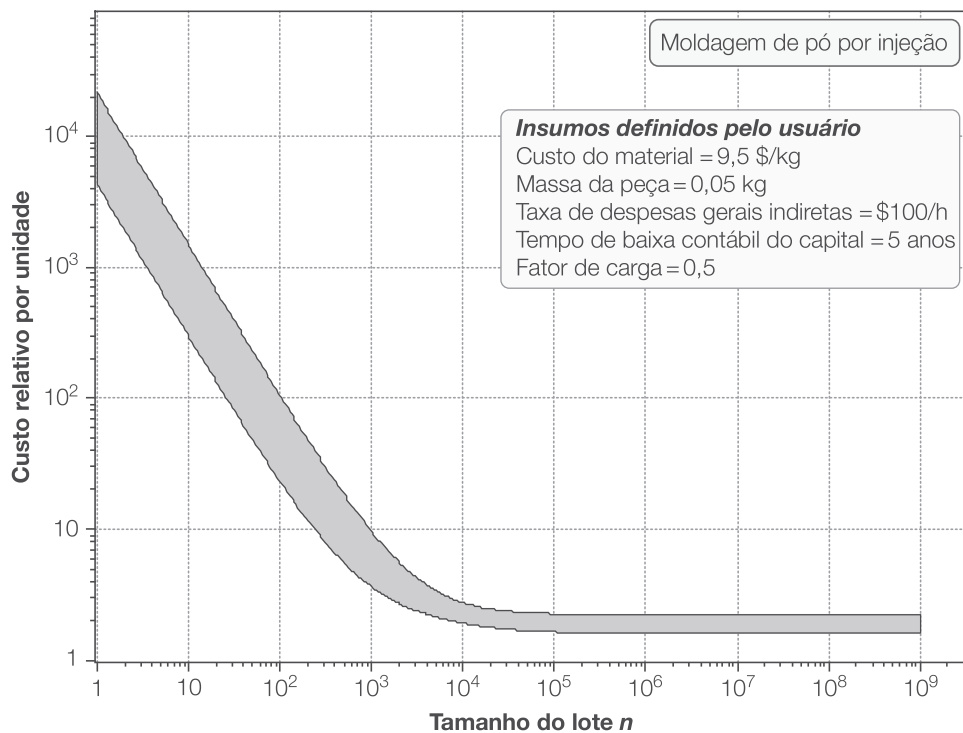
A família de métodos de pó é grande e inclui prensagem em molde e sinterização, prensagem a quente, extrusão de pó, moldagem de pó por injeção, prensagem isostática de pó e deposição de spray. Esses (e outros) poderiam ser adicionados aos diagramas, porém isso pode torná-los desajeitados. É melhor manipular as informações em ambiente de computador. O sistema CES faz isso.

Aplicar as restrições apresentadas na Tabela 14.7 elimina todos os processos em seu banco de dados, com exceção de dois: prensagem em molde e sinterização e moldagem por injeção de pó (powder injection molding – PIM: conformação de um pó por mistura com um aglomerante de polímero, moldagem, e então eliminação do aglomerante por queima durante a sinterização subsequente). O mesmo sistema implementa o modelo de custo que foi descrito no Capítulo 13.

Seu resultado, mostrando o custo, em unidades de custo do material para PIM, é apresentado na Figura 14.13. Os insumos definidos pelo usuário estão em cima, à direita. O custo unitário, alto quando os tamanhos de lotes são baixos, cai a aproximadamente duas vezes o do material quando os tamanhos de lotes estão acima de aproximadamente 10.000.

Observação Isoladores encontrados no comércio são produzidos por PIM. Os aspectos econômicos, para um produto produzido em massa como esse, são críticos – até os centavos contam. A modelagem de custo técnico, descrita no Capítulo 13, pode guiar a escolha do melhor equipamento e das condições de operação ótimas para minimizar custo.

Tabela 14.7 Requisitos de processo para o isolador da vela de ignição		
Função	Isolador	
Restrições	Material: alumina	} – Restrições técnicas
	Forma: 3D oca	
	Massa: 0,04–0,06 kg	
	Seção mínima: 1,5 mm	} – Restrições de qualidade
	Tolerância: $< \pm 0,3$ mm	
	Rugosidade da superfície: $< 10 \mu\text{m}$	
	Tamanho do lote: 100.000	} – Restrição econômica
Objetivo	Minimizar custo	
Variáveis livres	Escolha de processo	
	Condições de operação do processo	

**FIGURA 14.13**

O custo unitário em função do tamanho do lote para moldagem de pó por injeção de um pequeno isolador. O custo está normalizado pelo custo do material.

Estudos de casos relacionados

- 6.18 "Dissipadores de calor para microchips quentes"
- 14.5 "Uma camisa para tubo de distribuição"

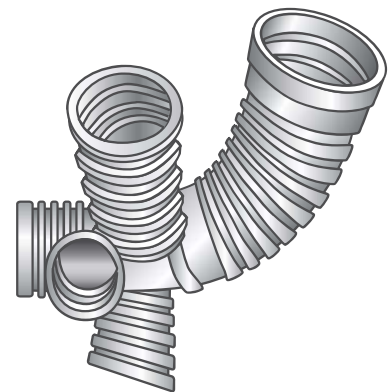
14.5 UM COLETOR DE ADMISSÃO

Os requisitos de projeto O coletor de admissão mostrado na Figura 14.14 é parte do sistema de propulsão de um veículo espacial. Deve ser feito de níquel. É grande, pesa aproximadamente 7 kg e é complexo, visto que sua forma é assimétrica, oca e tridimensional.

A espessura da seção mínima é entre 2 e 5 mm. Os requisitos para precisão e acabamento de superfície são rigorosos (tolerância $< \pm 0,1$ mm, rugosidade $< 20 \mu\text{m}$). Em razão de sua aplicação limitada, somente 20 unidades serão fabricadas. A Tabela 14.8 apresenta os requisitos.

Os diagramas não podem dar muita orientação para a seleção de processos para fabricar tal componente complexo. Então, recorreremos à seleção por computador.

A seleção As restrições são aplicadas digitando-as em uma caixa de diálogo de seleção de limites como a da Figura 5.12

**FIGURA 14.14**

Um coletor de admissão. (Desenho baseado em Bralla, 1986.)

Tabela 14.8 Requisitos de processo para o coletor de admissão

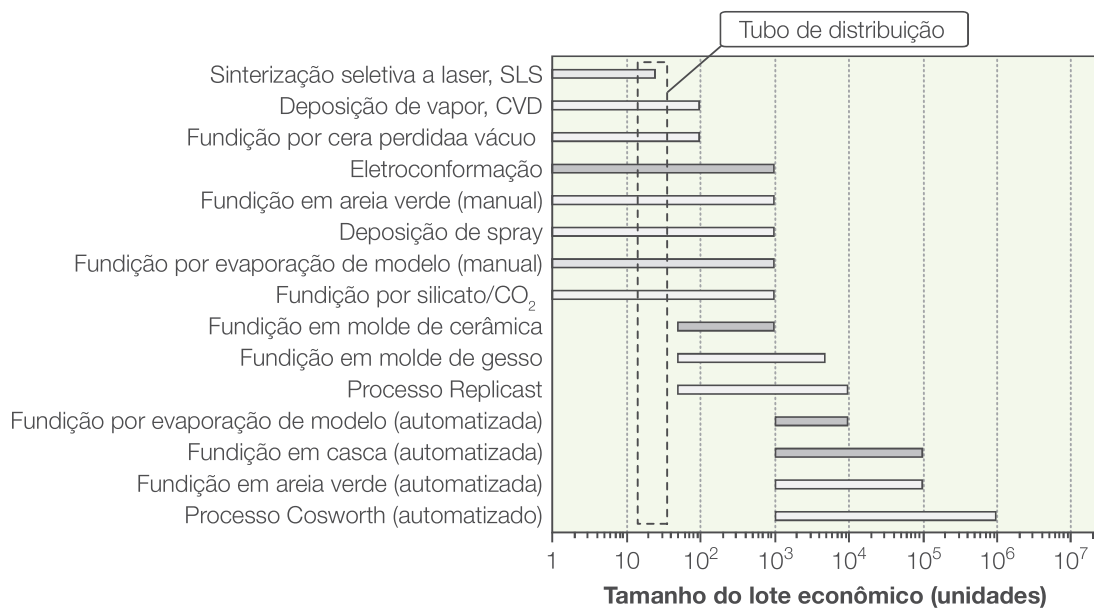
Função	Coletor de admissão	
Restrições	Material: níquel	} – Restrições técnicas } – Restrições de qualidade } – Restrição econômica
	Forma: 3D oca	
	Massa: 7kg	
	Seção mínima: 2–5mm	
	Tolerância: $< \pm 0,1\text{mm}$	
	Rugosidade da superfície: $< 20\mu\text{m}$	
	Tamanho do lote: 20	
Objetivo	Minimizar custo	
Variáveis livres	Escolha de processo	
	Condições de operação do processo	

(esquerda). A restrição de material (níquel) e a restrição de forma (3D oca) eliminam um grande número de processos. A Figura 14.15 mostra 15 que sobreviveram. As restrições subsequentes à massa e à espessura da seção eliminam mais alguns, sobrando apenas os seis representados em cores na Figura. A aplicação de rigorosas restrições à tolerância e à rugosidade da superfície elimina todos, exceto um: eletroconformação. O tamanho de lote requerido encontra-se dentro de sua faixa.

Observação Uma busca por informações adicionais nas fontes apresentadas no Apêndice D revela que a eletroconformação de níquel é uma prática estabelecida e que componentes de até 20 kg são fabricados por esse processo. Parece uma boa escolha.

Estudo de caso relacionado

14.4 “Isoladores para velas de ignição”


FIGURA 14.15

Resultado da seleção por computador de processos para fazer o tubo de distribuição. Os processos em cinza não atenderam uma ou mais restrições.

14.6 UNIÃO DE UM RADIADOR DE AÇO

A Figura 14.16 mostra uma seção de um radiador doméstico feito de chapa de aço prensada corrugada. A tarefa é escolher um processo de união para as costuras entre as chapas.

Os requisitos de processo O processo deve ser compatível com o material; aqui chapa de aço de baixo teor de carbono de 1,5mm de espessura. As juntas sobrepostas suportam apenas baixas cargas em serviço, mas a manipulação durante a instalação pode impor tensão e cisalhamento. Elas devem conduzir calor, ser à prova d'água e poder tolerar temperaturas de até 100°C. Não há necessidade de desmontar as juntas para reciclagem ao final da vida útil, visto que o equipamento inteiro é feito de aço. A Tabela 14.9 resume a tradução.

A seleção O sistema CES tem registros e atributos para 52 processos de união. Se aplicarmos a restrição de material encontraremos 32 deles – os eliminados são processos específicos para polímeros ou específicos para compósitos. Triagem adicional para geometria de junção, modo de carregamento e espessura de seção reduz a lista a 20. O requisito da condução de calor reduz esse número a 12. A resistência à água e a temperatura de operação não provocam

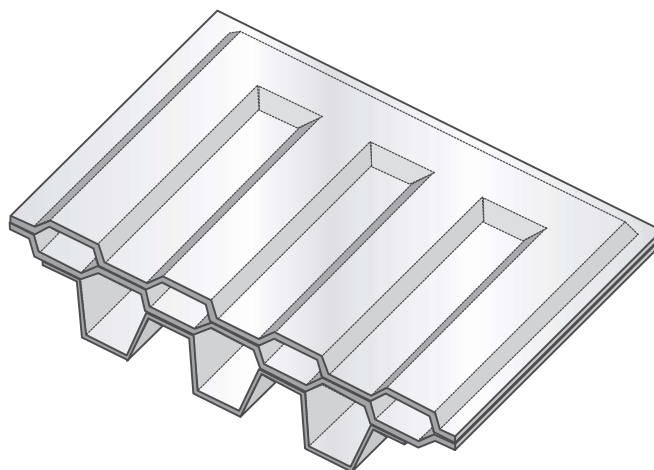


FIGURA 14.16

Uma seção de um radiador doméstico. As três seções prensadas de aço são unidas por juntas sobrepostas.

Tabela 14.9 Tradução para união de um radiador de aço	
Função	Radiador doméstico
Objetivo	Minimizar custo
Restrições	Compatibilidade de material: aço de baixo teor de carbono Geometria da junção: junta sobreposta Modo de carregamento: tração, cisalhamento (moderados) Espessura da chapa: 1–2 mm Junta deve conduzir calor Junta deve ser à prova d'água Temperatura de serviço > 100°C Desmontagem não exigida
Variáveis livres	Escolha de processos de conformação Condições de operação do processo

} – Restrições técnicas

nenhuma mudança adicional na lista curta. Os processos que passaram no estágio de triagem são apresentados na Tabela 14.10.

Observação Nesse ponto procuramos documentação para os processos. Isso revela que a soldagem explosiva exige instalações e autorizações especiais (dificilmente uma surpresa). A soldagem por feixe de elétrons e a soldagem por feixe de laser exigem equipamento caro, portanto pode ser necessário usar instalações compartilhadas para que esses processos fiquem econômicos. A soldagem por pontos à resistência é eliminada na triagem porque não cumpriu o requisito de ser à prova d'água, embora essa exigência se aplique apenas às costuras de bordas.

As restrições de qualidade não são rigorosas, porém distorção e tensão residual dificultarão o ajuste correto de juntas adjacentes. Aços de baixo teor de carbono prestam-se muito bem à soldagem, portanto é improvável que esse processo cause trincas ou fragilização – porém isso pode ser verificado por pesquisa de documentação.

14.7 ENDURECIMENTO DA SUPERFÍCIE DA PISTA DE UM ROLAMENTO DE ESFERAS

As esferas de pistas de mancais de esferas correm em trilhas com ranhuras (Figura 14.17). A vida útil de uma pista de esfera é limitada por desgaste e por fadiga. Ambos são suprimidos com a utilização de materiais duros. Contudo, materiais duros não são tenazes, e a pista corre o risco de sofrer fratura por carregamento de choque ou manuseio impróprio.

Os requisitos de projeto A solução é usar um aço-liga, que tem excelentes propriedades de compressibilidade, e aplicar um tratamento de superfície separado para aumentar a dureza onde isso é importante. Portanto, procuramos processos para endurecer superfícies de aços-ligas para resistência a desgaste e a fadiga. A precisão de ambas, esferas e pistas, é crítica, logo o processo não deve comprometer as dimensões ou a lisura da superfície. A Tabela 14.11 resume a tradução.

A seleção O sistema CES contém registros para 46 processos de tratamento de superfície. Muitos são compatíveis com aços-ligas. A condição mais discriminadora é a finalidade do

Tabela 14.10 Lista curta de processos para união de um radiador de aço

Processo	Comentário
Soldagem Brasagem	Risco de corrosão que surge do contato elétrico entre metais diferentes
Soldagem com feixe de laser Soldagem com feixe de elétrons Soldagem explosiva	Processos especializados e caros
Soldagem de metal por arco elétrico a gás inerte (MIG) Soldagem a gás inerte de tungstênio (TIG) Soldagem manual de metal por arco (MMA) Soldagem por oxiacetileno Soldagem por projeção Soldagem a resistência	Processos de soldagem convencionais e bem estabelecidos

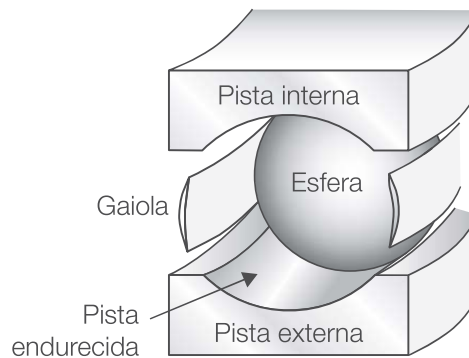


FIGURA 14.17

Uma seção de uma pista de mancal de esferas. As superfícies da pista devem ser endurecidas para resistir a desgaste e a nucleação de trincas de fadiga.

Tabela 14.11 Tradução para endurecimento da superfície da pista de um mancal de esferas	
Função	Pista de mancal de esferas
Objetivo	Minimizar custo
Restrições	Material: aço-liga Função do tratamento: endurecimento para resistência à fadiga e ao desgaste Cobertura da superfície curva: boa Precisão e acabamento da superfície não comprometem
Variáveis livres	Escolha do processo de tratamento da superfície Condições de operação do processo

} – Restrições técnicas
 } – Restrição de qualidade

tratamento – dar resistência a fadiga e desgaste – o que reduz a lista a 8. Impor o requisito de uma superfície muito lisa derruba os processos que revestem ou deformam a superfície porque esses comprometem o acabamento. Adicionando ainda a restrição de que a cobertura da superfície curva deve ser *boa* ou *muito boa* sobram apenas cinco, apresentados na Tabela 14.12. Os registros para esses descrevem e ilustram o processo, e resumem suas utilizações típicas.

Observação Para ir em frente, procuramos documentação para esses processos. A dureza da superfície e a profundidade da camada endurecida dependem de variáveis do processo: o tempo e a temperatura do tratamento e a composição do aço. E, claro, a economia também entra

Tabela 14.12 Lista curta de processos para endurecimento de uma pista de mancal de esferas de aço-liga	
Processo	Comentário
Carbonetação Carbonitruração Nitruração Aluminização Boretação Cromaço	Todos são processos de alta temperatura e condução controlada e, portanto, são lentos. A documentação contida nos registros dá detalhes.

na equação. Pistas de esferas são fabricadas em quantidades enormes, e embora seus tamanhos variem, a geometria não. É aqui que um equipamento dedicado, ainda que muito caro, é viável.

14.8 RESUMO E CONCLUSÕES

Seleção de processos, à primeira vista, parece magia negra: os iniciados conhecem; o restante do mundo nem ao menos imagina como eles a fazem. Porém – como o capítulo demonstra –, isso não é verdade. A abordagem sistemática, desenvolvida no Capítulo 13 e ilustrada aqui, identifica um subconjunto de processos viáveis usando somente informações de projeto: tamanho, forma, complexidade, precisão, rugosidade e material – esse escolhido pelos métodos sistemáticos do Capítulo 5. Não identifica a única e melhor escolha; isso depende de um número muito grande de considerações específicas de cada caso. Contudo, por identificar candidatos, dirige o usuário a fontes de dados (começando com as apresentadas no Apêndice D) que fornecem os detalhes necessários para a seleção final.