

Capítulo 9

Processamento o morfológico de imagens



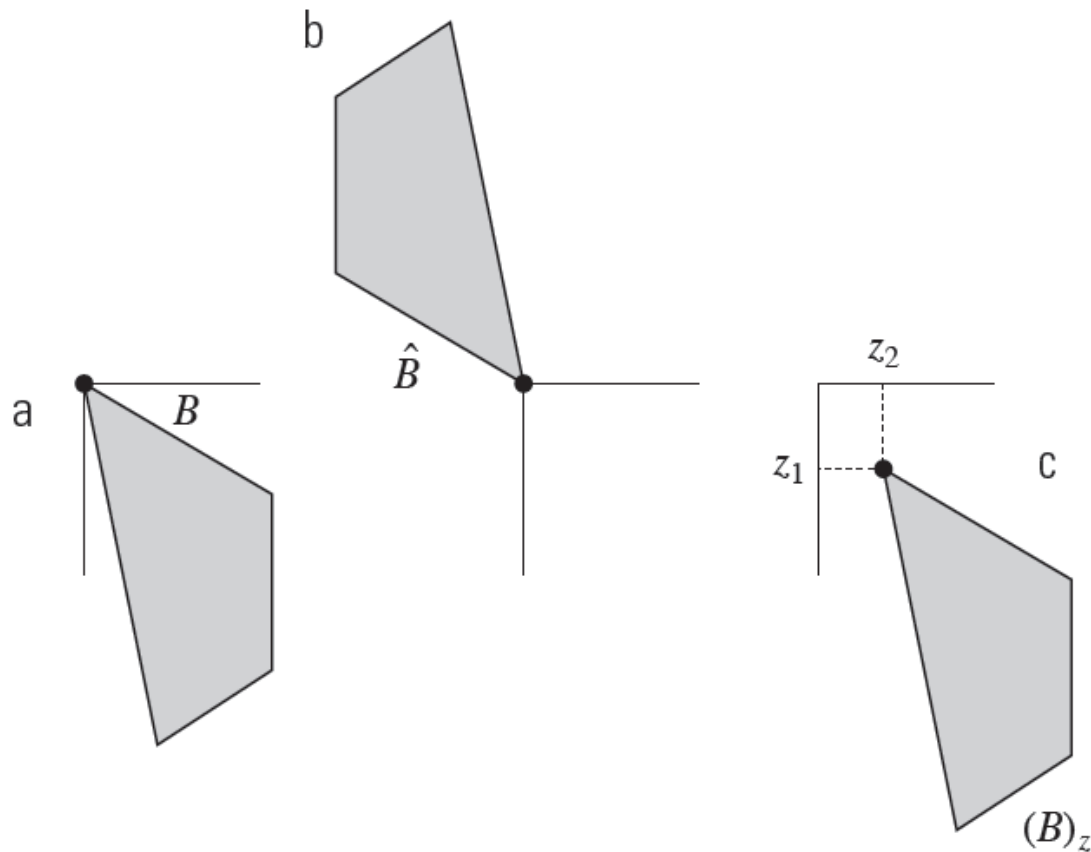


Figura 9.1 (a) Um conjunto, (b) sua reflexão e (c) a sua translação por z .

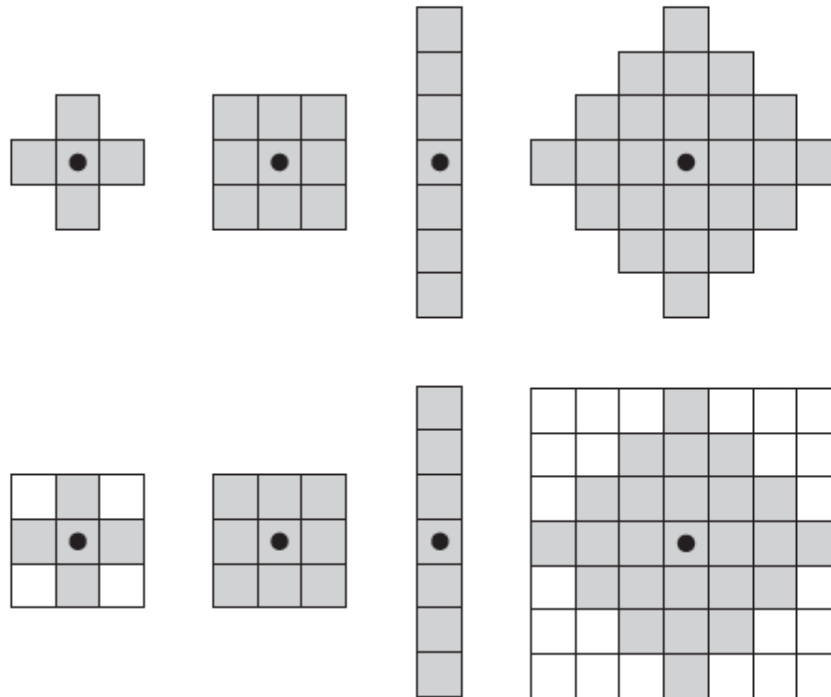


Figura 9.2 Primeira linha: exemplos de elementos estruturantes. Segunda linha: elementos estruturantes convertidos em arranjos retangulares. Os pontos indicam os centros dos ESs.

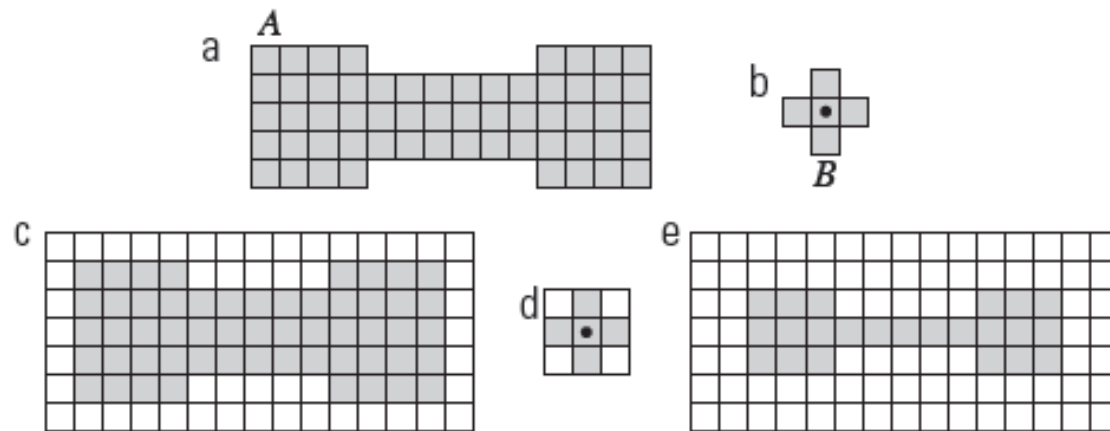


Figura 9.3 (a) Um conjunto (cada quadrado sombreado é um membro do conjunto). (b) Um elemento estruturante. (c) O conjunto preenchido com elementos de fundo para formar um arranjo matricial retangular e fornecer um contorno de fundo. (d) Elemento estruturante como um arranjo matricial retangular. (e) Conjunto processado pelo elemento estruturante.

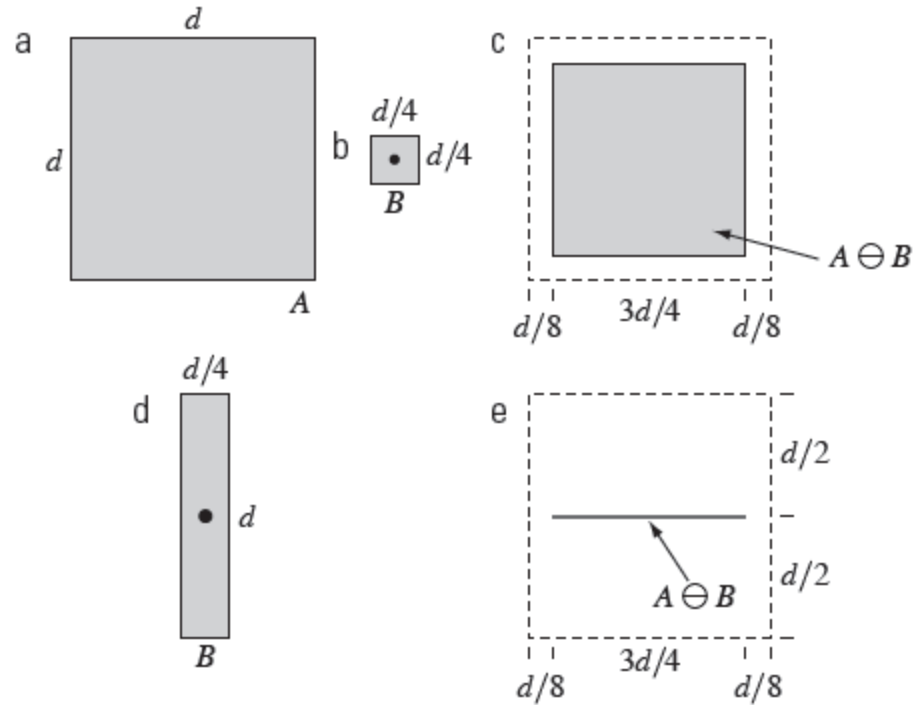


Figura 9.4 (a) Conjunto A . (b) Elemento estruturante quadrado, B . (c) Erosão de A por B , mostrada sombreada. (d) Elemento estruturante alongado. (e) Erosão de A por B utilizando esse elemento. A borda pontilhada em (c) e (e) é a fronteira do conjunto A , apresentada apenas como referência.

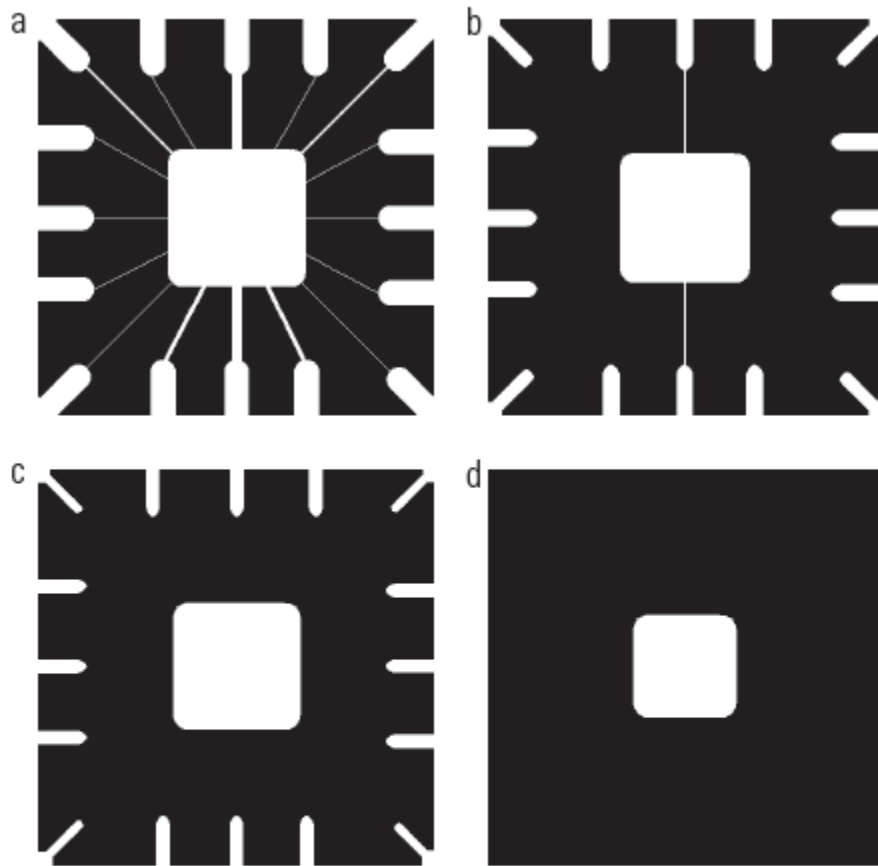


Figura 9.5 Usando a erosão para remover componentes da imagem. (a) Uma imagem binária 486×486 de uma conexão *wire-bond*. (b) a (d) Imagem erodida utilizando elementos estruturantes quadrados de tamanhos 11×11 , 15×15 e 45×45 , respectivamente. Os componentes dos ES eram todos 1s.

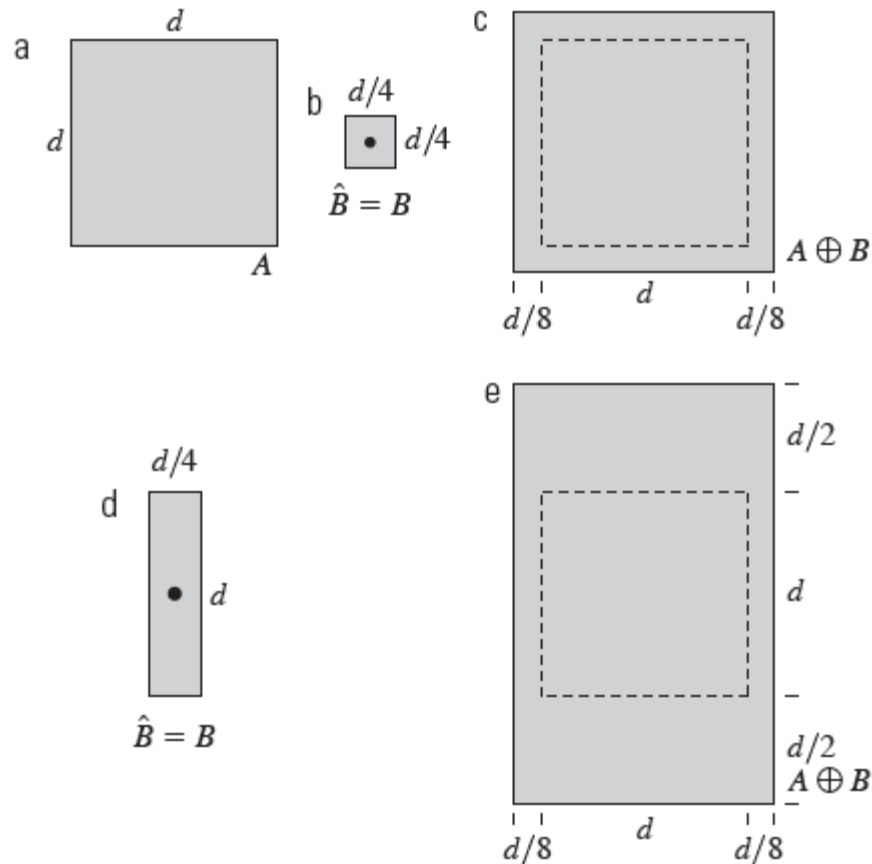


Figura 9.6 (a) Conjunto A . (b) Elemento estruturante quadrado (o ponto mostra a origem). (c) Dilatação de A por B , mostrada sombreada. (d) Elemento estruturante alongado. (e) Dilatação de A utilizando esse elemento estruturante. A borda pontilhada em (c) e (e) é a fronteira do conjunto A , apresentada apenas para referência.

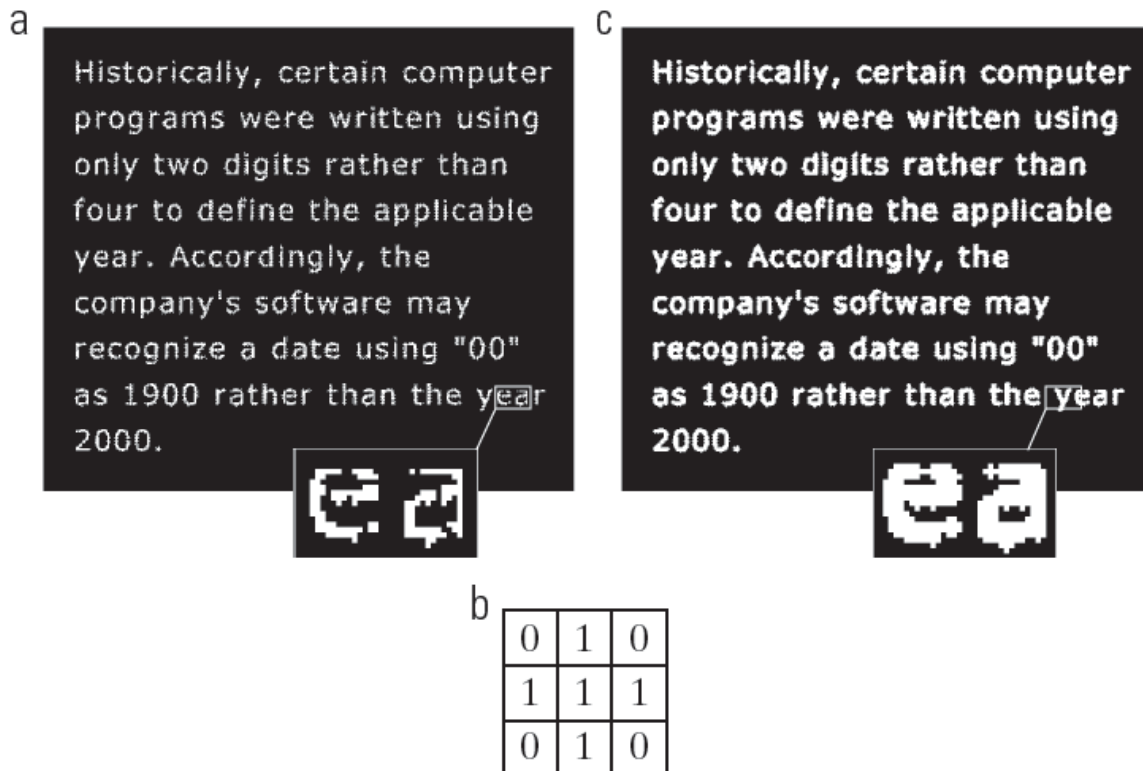


Figura 9.7 (a) Amostra de um texto de baixa resolução com caracteres quebrados (veja a imagem ampliada). (b) Elemento estruturante. (c) Dilatação de (a) por (b). Os segmentos quebrados foram juntados.

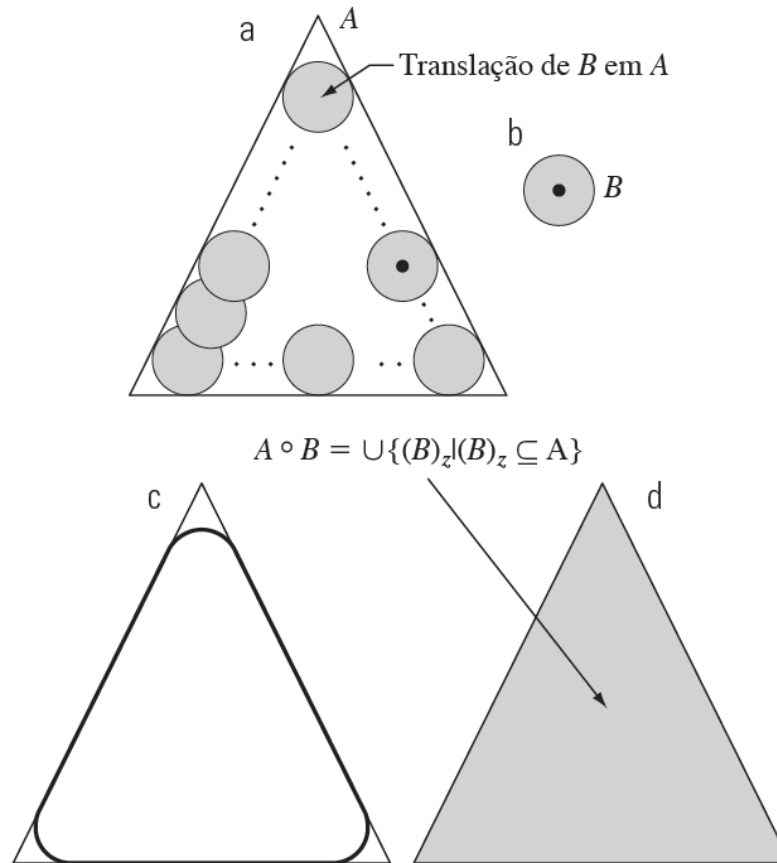


Figura 9.8 (a) Elemento estruturante B “rolando” pela parte de dentro da fronteira de A (o ponto indica a origem de B). (b) Elemento estruturante. (c) A linha grossa é a fronteira exterior da abertura. (d) Abertura completa (sombreada). Não sombreamos A em (a) para melhor compreensão.



Figura 9.9 (a) Elemento estruturante B "rolando" pela fronteira exterior do conjunto A . (b) A linha grossa é a fronteira exterior do fechamento. (c) Fechamento completo (sombreado). Não sombreamos A em (a) para melhor compreensão.

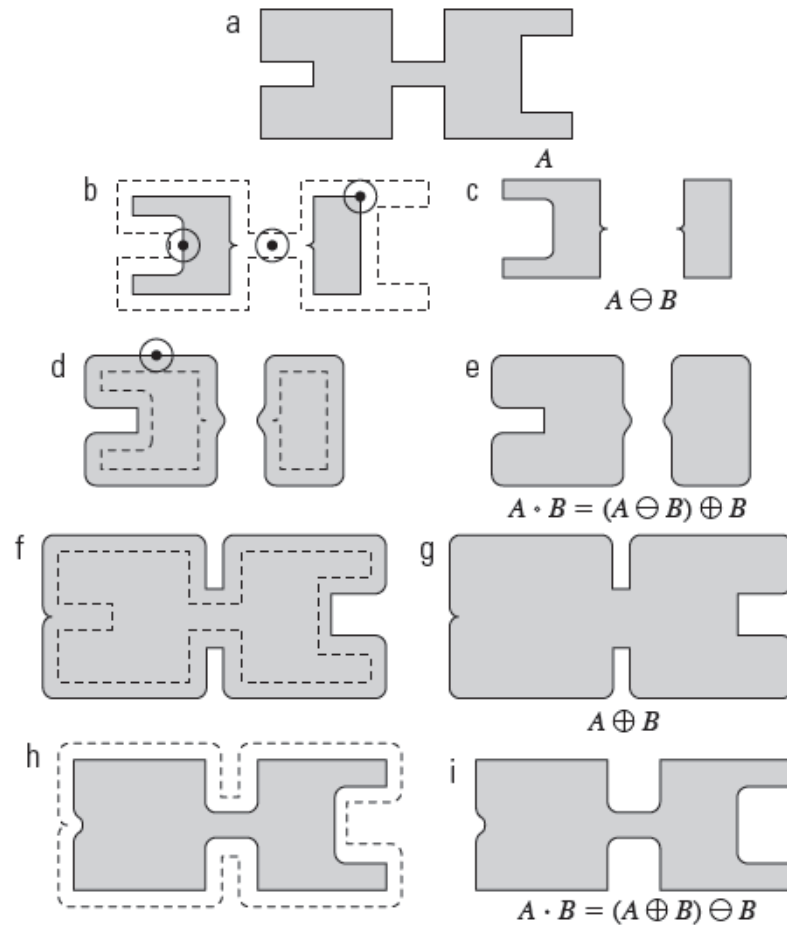


Figura 9.10 Abertura e fechamento morfológicos. O elemento estruturante é o pequeno círculo mostrado em várias posições em (b). O ES não foi sombreado aqui para uma melhor compreensão. O ponto preto é o centro do elemento estruturante.

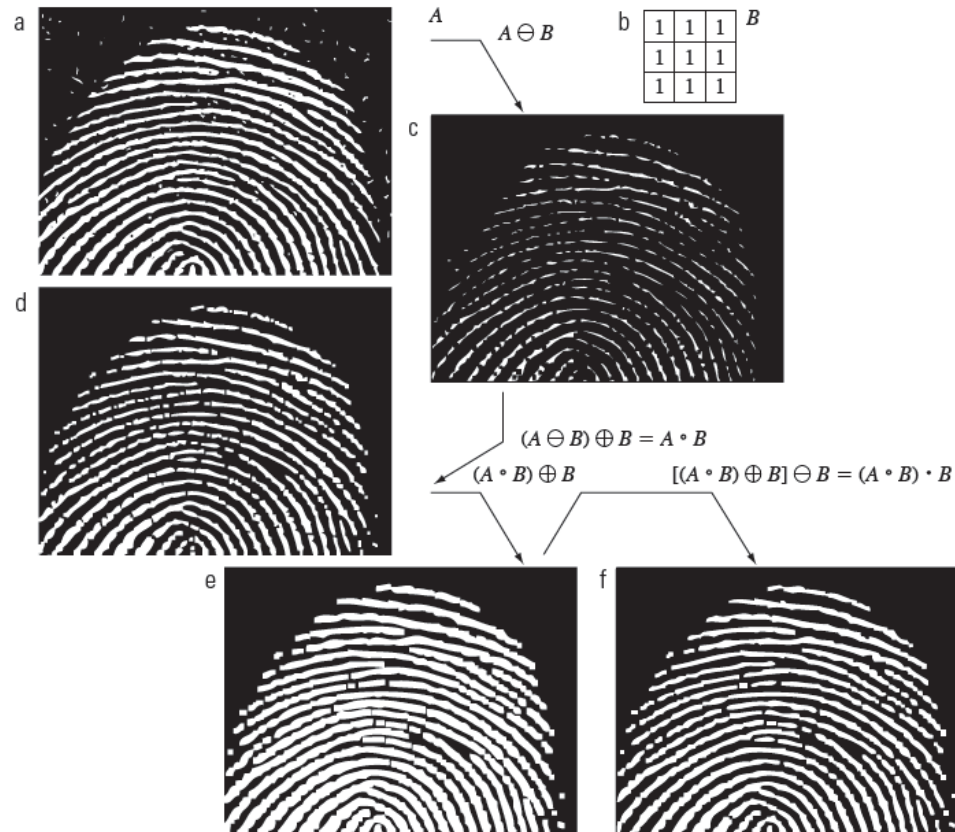


Figura 9.11 (a) Imagem ruidosa. (b) Elemento estruturante. (c) Imagem erodida. (d) Abertura de A . (e) Dilatação da abertura. (f) Fechamento da abertura. (Imagem original: cortesia do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia.)

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

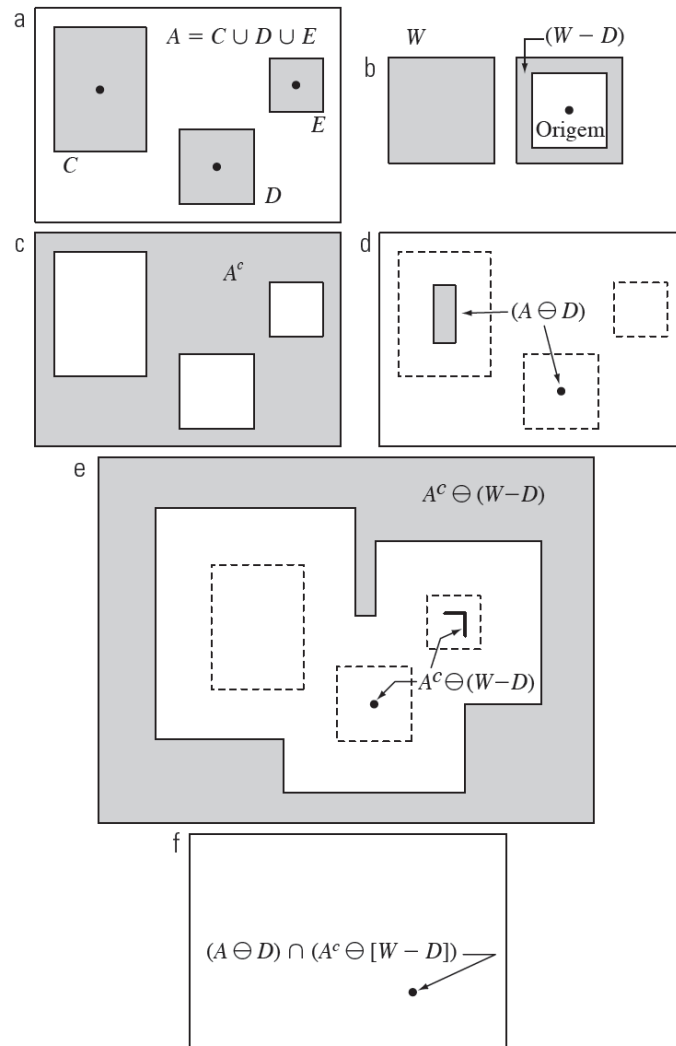


Figura 9.12 (a) Conjunto A . (b) Uma janela, W , e o fundo local de D em relação a W , $(W - D)$. (c) Complemento de A . (d) Erosão de A por D . (e) Erosão de A^c por $(W - D)$. (f) Intersecção entre (d) e (e), mostrando a localização da origem de D , como desejado. Os pontos indicam as origens de C , D e E .

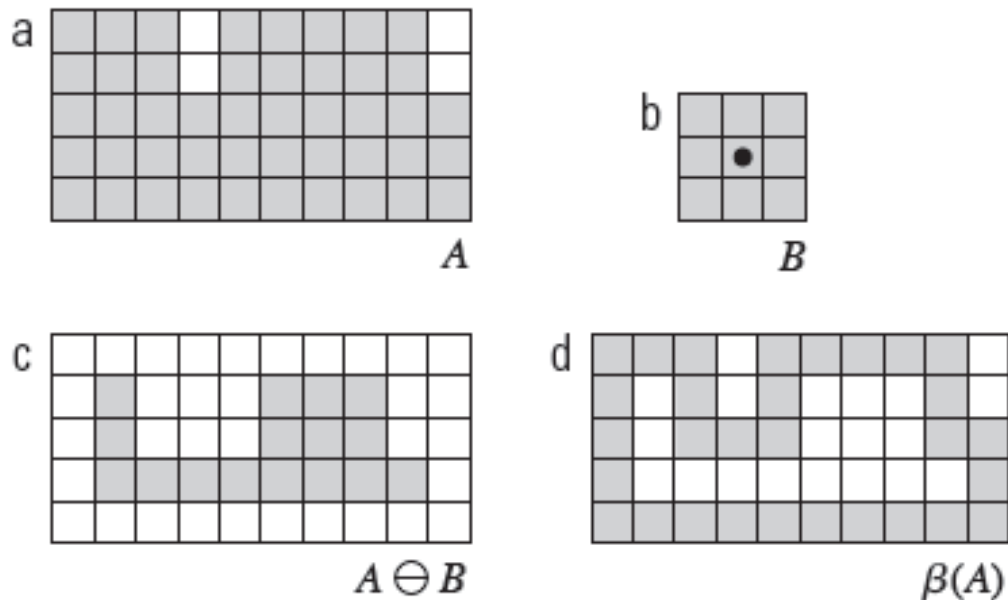


Figura 9.13 (a) Conjunto A . (b) Elemento estruturante B . (c) A erodido por B . (d) Fronteira, dada pela diferença entre A e sua erosão.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

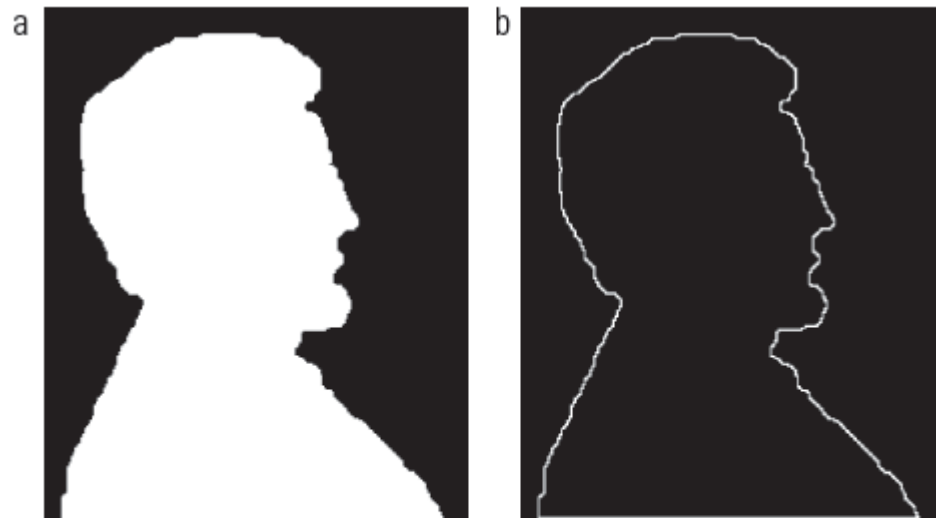


Figura 9.14 (a) Uma imagem binária simples, com os 1s representados em branco. (b) Resultado da utilização da Equação 9.5-1 com o elemento estruturante da Figura 9.13(b).

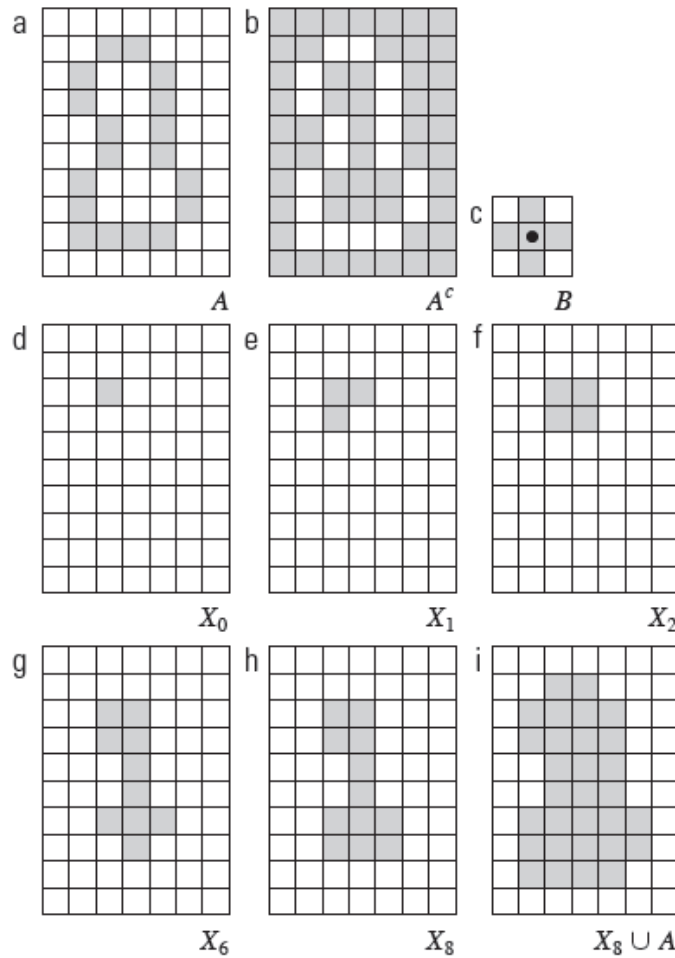


Figura 9.15 Preenchimento de buracos. (a) Conjunto A (sombreado). (b) Complemento de A . (c) Elemento estruturante B . (d) Ponto inicial dentro da fronteira. (e) a (h) Vários passos da Equação 9.5-2. (i) Resultado final [união de (a) e (h)].

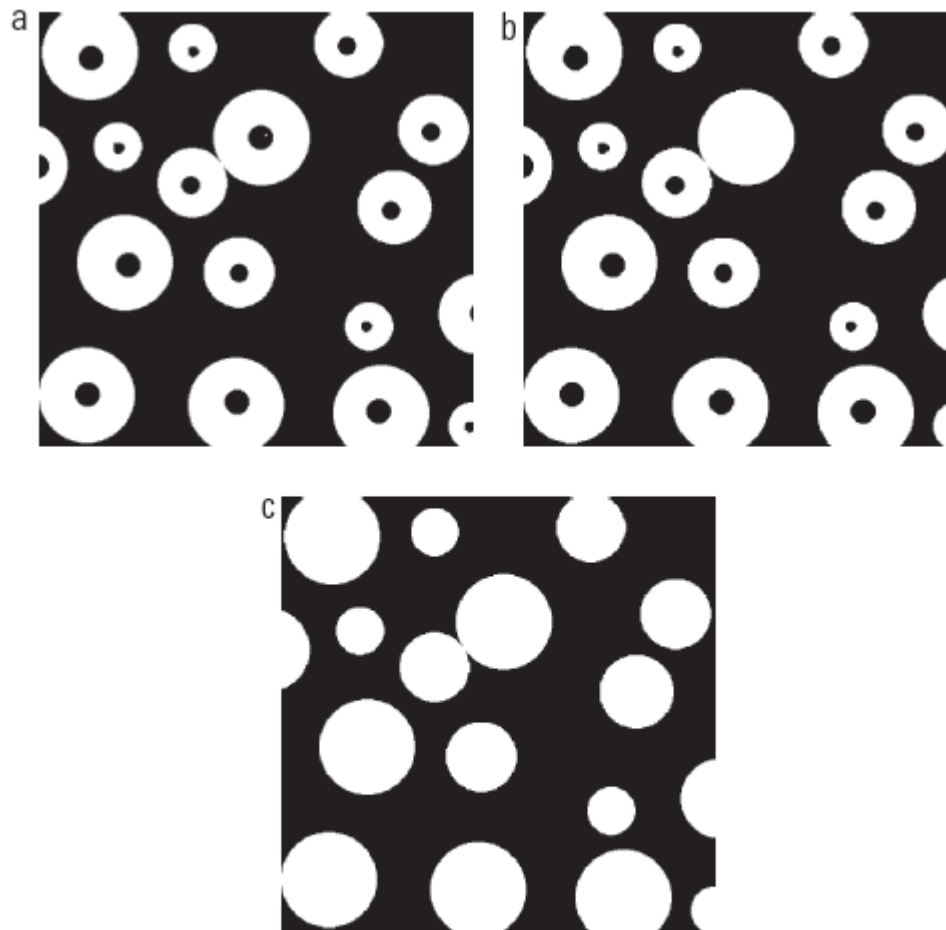


Figura 9.16 (a) Imagem binária (o ponto branco dentro de uma das regiões é o ponto de partida para o algoritmo de preenchimento de buracos). (b) Resultado do preenchimento daquela região. (c) Resultado do preenchimento de todos os buracos.

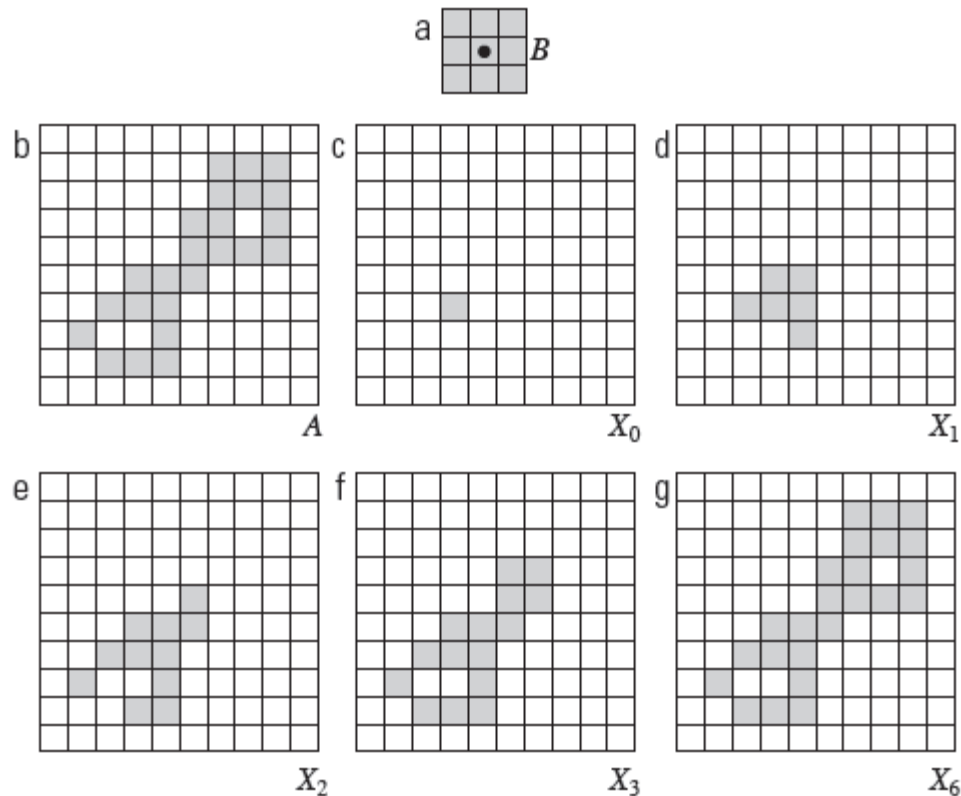
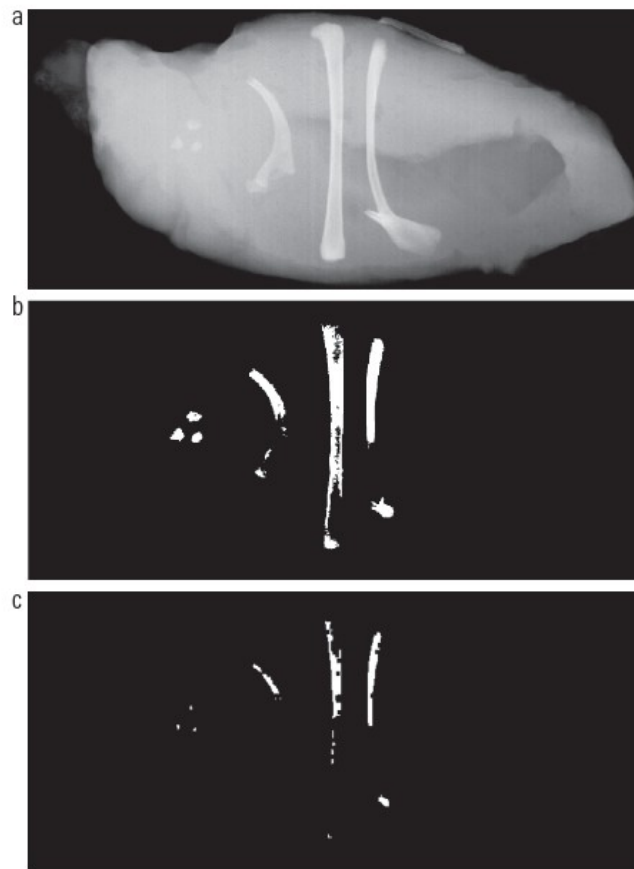


Figura 9.17 Extraíndo componentes conexos. (a) Elemento estruturante. (b) Arranjo matricial contendo um conjunto com um componente conexo. (c) Arranjo inicial contendo um 1 na região do componente conexo. (d) a (g) Vários passos na iteração da Equação 9.5-3.



d

Componente conexo	Número de pixels no componente conexo
	11
	9
	9
	39
	133
	1
	1
	743
	7
10	11
11	11
12	9
13	9
14	674
15	85

Figura 9.18 (a) Imagem de raios X de um filé de frango com fragmentos de ossos. (b) Imagem binarizada. (c) Imagem erodida com um elemento estruturante 5×5 formado de 1s. (d) Número de pixels nos componentes conexos de (c). (Imagem original: cortesia do NTB Elektronische Geräte GmbH, Diepholz, Alemanha, www.ntbxray.com.)

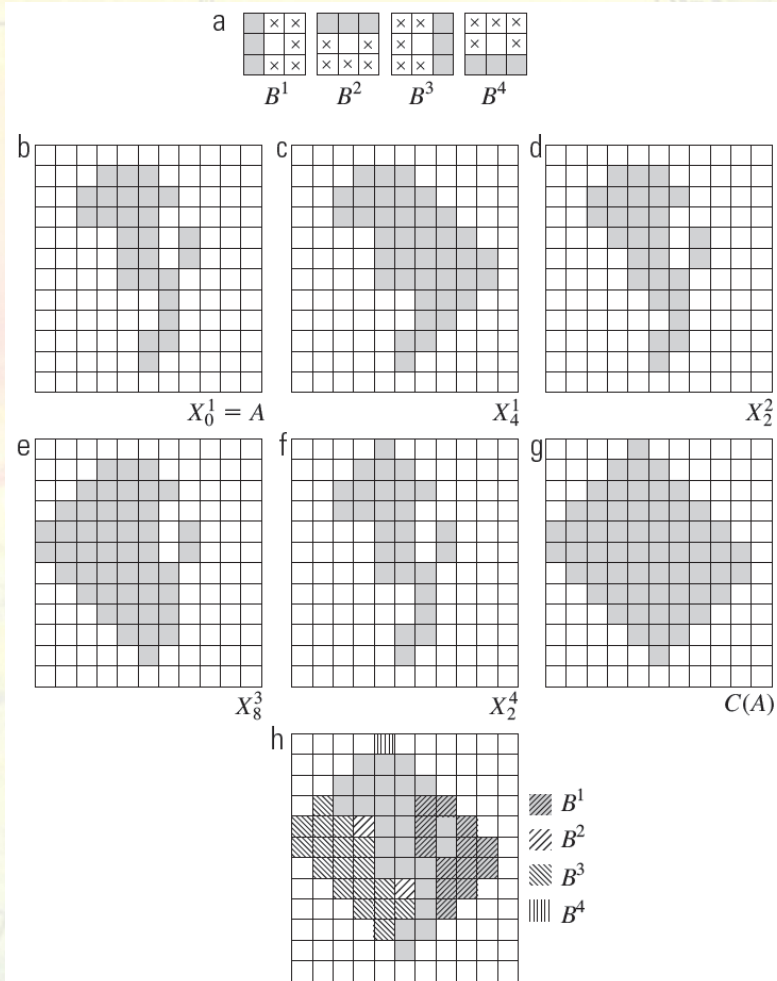


Figura 9.19 (a) Elementos estruturantes. (b) Conjunto A . (c) a (f) Resultados da convergência com os elementos estruturantes mostrados em (a). (g) Fecho convexo. (h) Fecho convexo mostrando a contribuição de cada elemento estruturante.

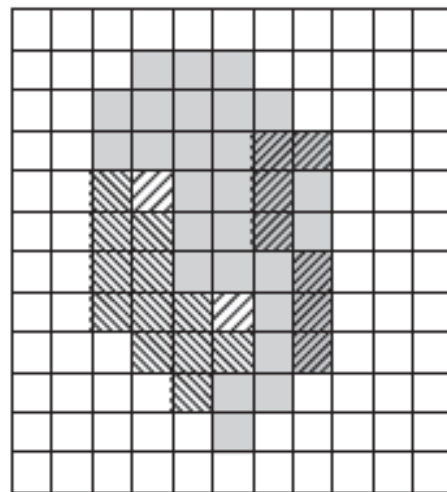


Figura 9.20 Resultado de limitar o crescimento do algoritmo de fecho convexo para as dimensões máximas do conjunto original de pontos nas direções vertical e horizontal.

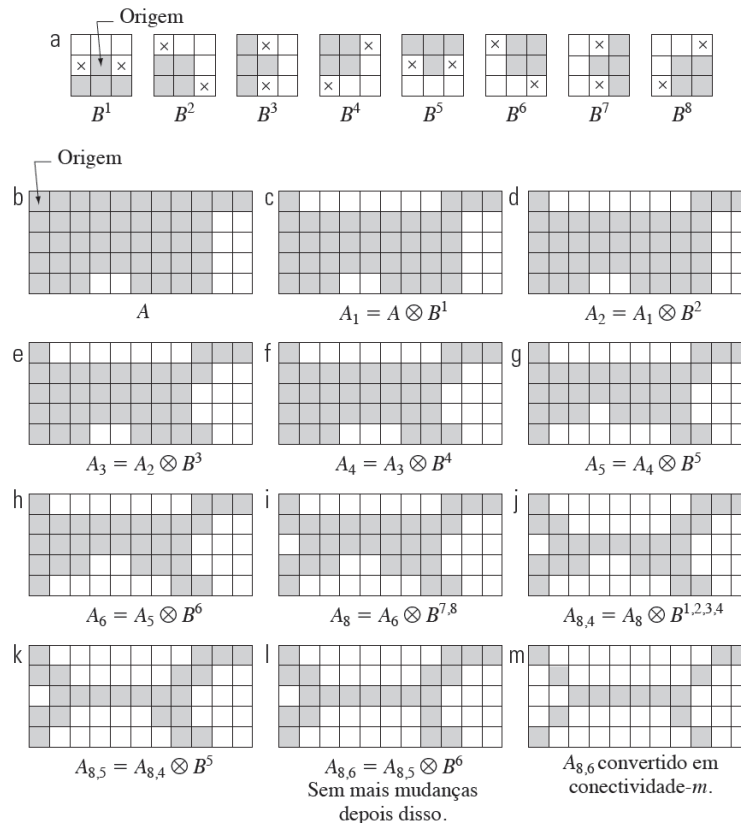


Figura 9.21 (a) Sequência de elementos estruturantes rotacionados que são utilizados para o afinamento. (b) Conjunto A . (c) Resultado do afinamento com o primeiro elemento. (d) a (i) Resultados do afinamento com os sete elementos seguintes (não houve alteração entre o sétimo e oitavo elementos). (j) Resultado de utilizar os quatro primeiros elementos novamente. (l) Resultado após a convergência. (m) Conversão para a conectividade- m .

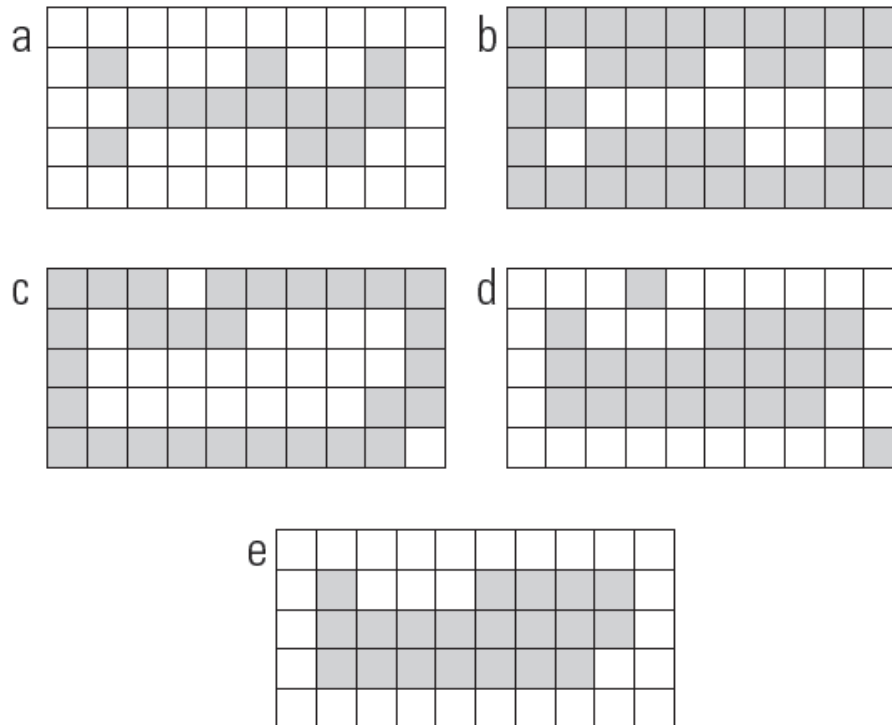


Figura 9.22 (a) Conjunto A. (b) Complemento de A. (c) Resultado do afinamento do complemento de A. (d) Espessamento obtido complementando (c). (e) Resultado final, sem pontos desconectados.

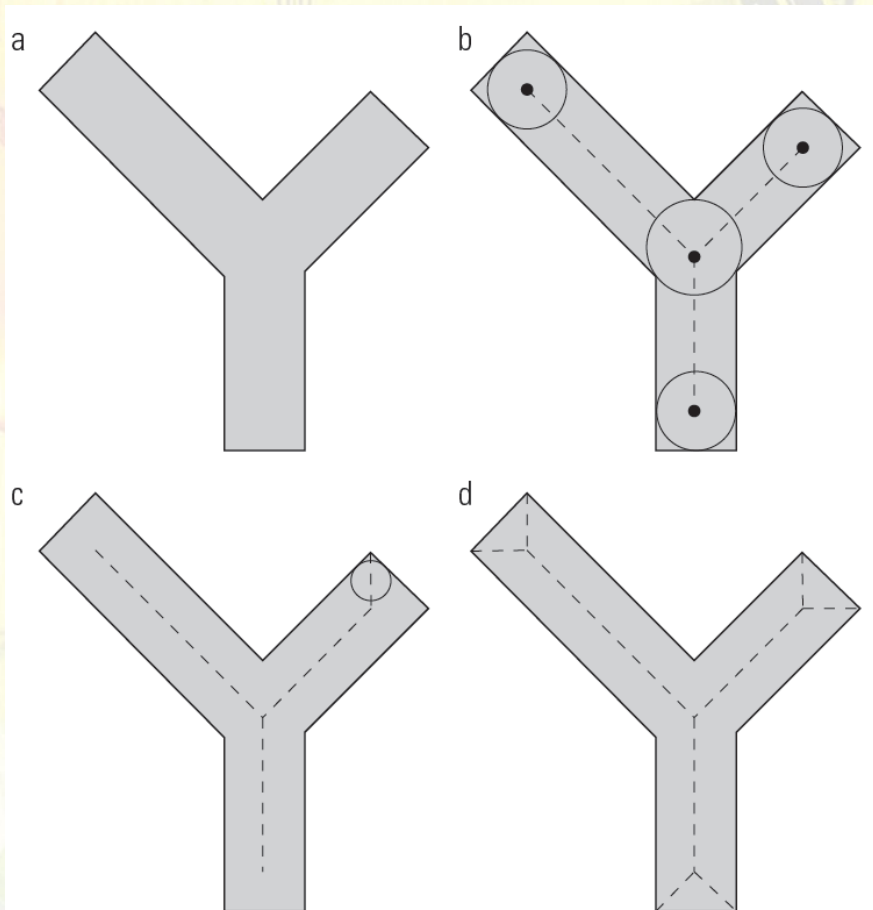


Figura 9.23 (a) Conjunto A. (b) Diversas posições dos discos máximos com os centros sobre o esqueleto de A. (c) Outro disco máximo em um segmento diferente do esqueleto de A. (d) Esqueleto completo.

k	$A \ominus kB$	$(A \ominus kB) \circ B$	$S_k(A)$	$\bigcup_{k=0}^K S_k(A)$	$S_k(A) \oplus kB$	$\bigcup_{k=0}^K S_k(A) \oplus kB$
0						
1						
2						

Figura 9.24 Implementação das equações 9.5-11 até 9.5-15. O conjunto original está na parte superior esquerda e seu esqueleto morfológico está na parte de baixo da quarta coluna. O conjunto reconstruído está na parte de baixo da sexta coluna.

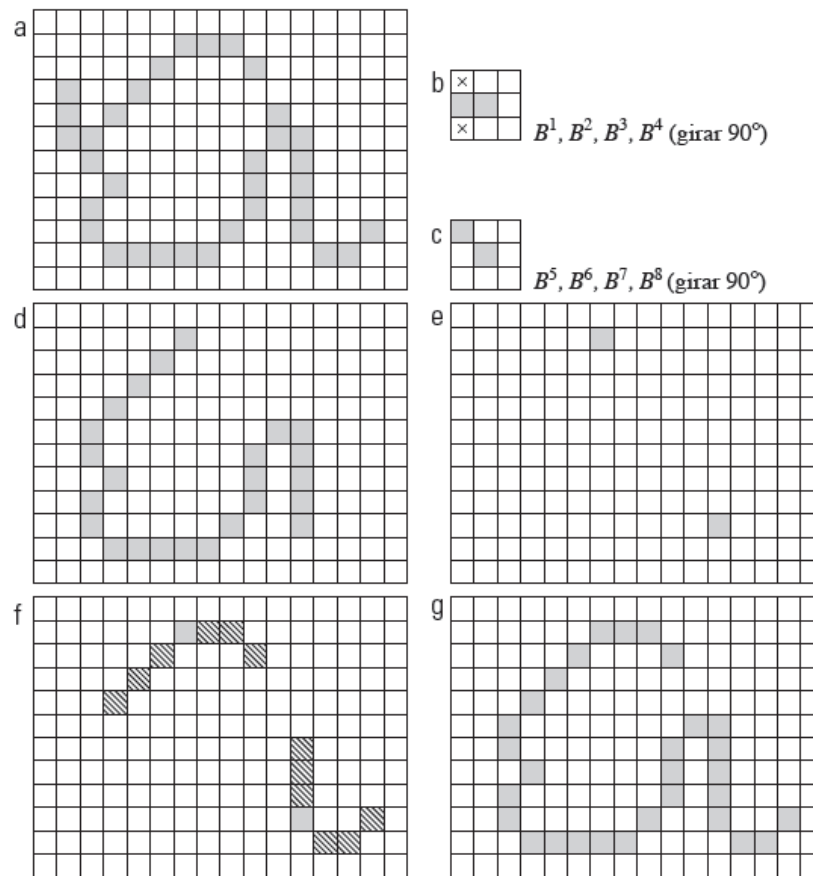


Figura 9.25 (a) Imagem original. (b) e (c) Elementos estruturantes utilizados para eliminar os pontos extremos. (d) Resultado de três ciclos de afinamento. (e) Extremidades de (d). (f) Dilatação das extremidades condicionadas em (a). (g) Imagem podada.

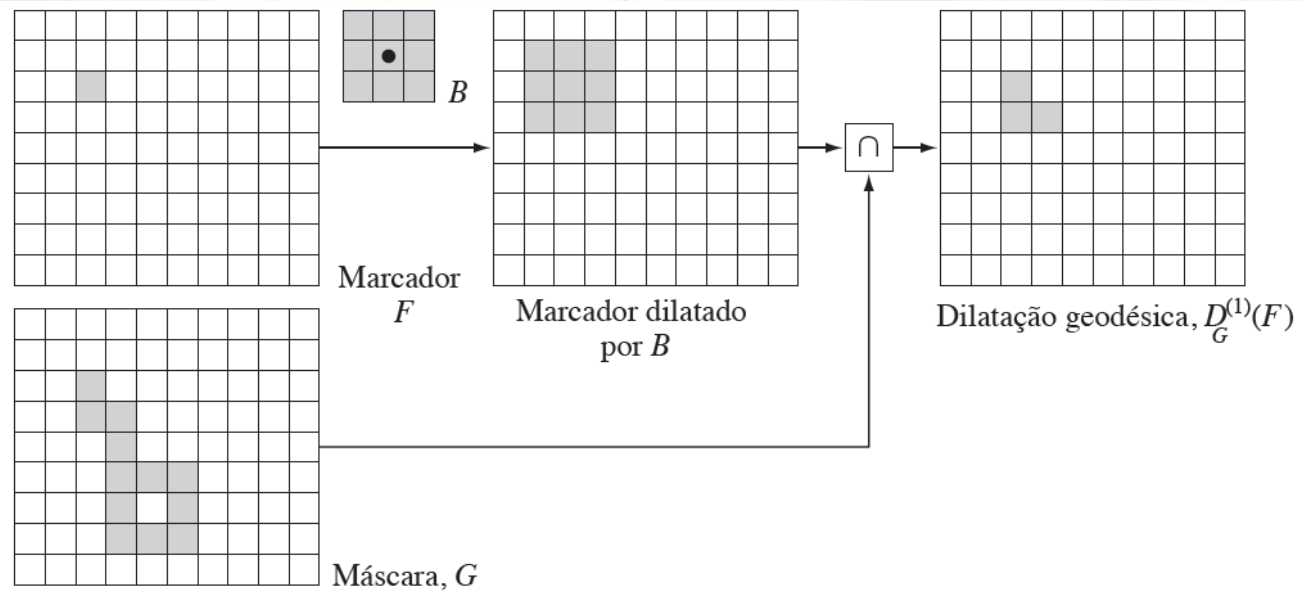


Figura 9.26 Ilustração da dilatação geodésica.

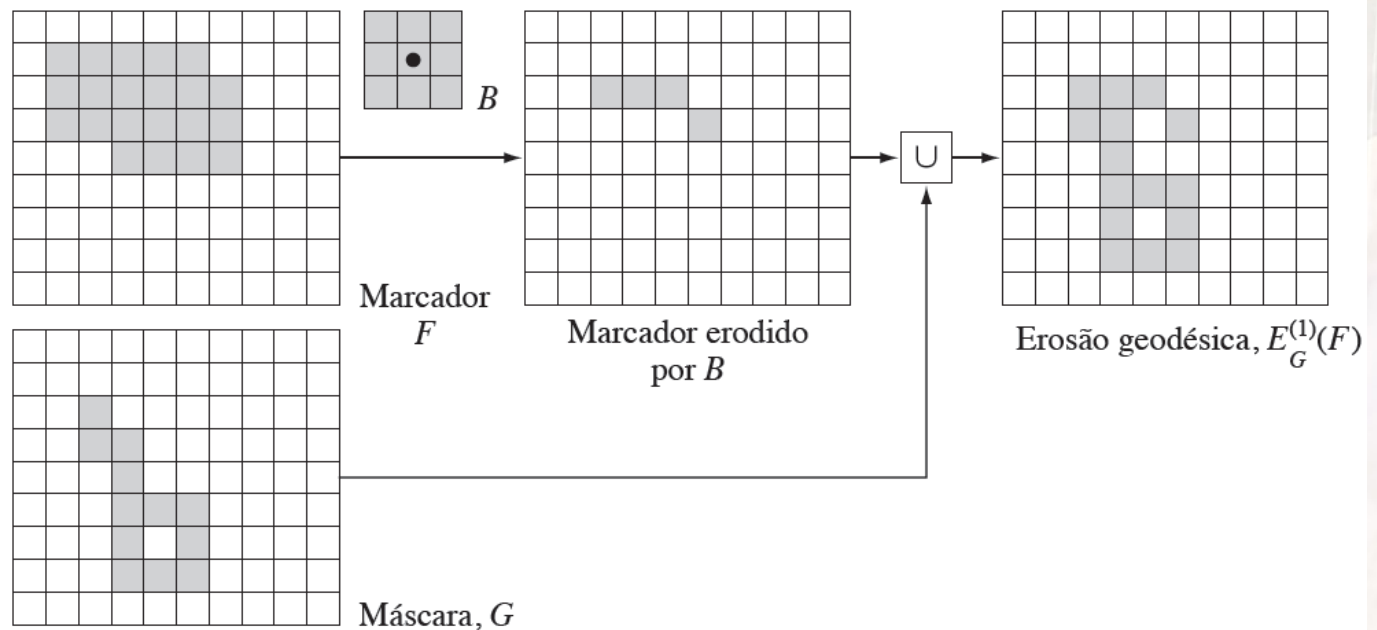


Figura 9.27 Ilustração da erosão geodésica.

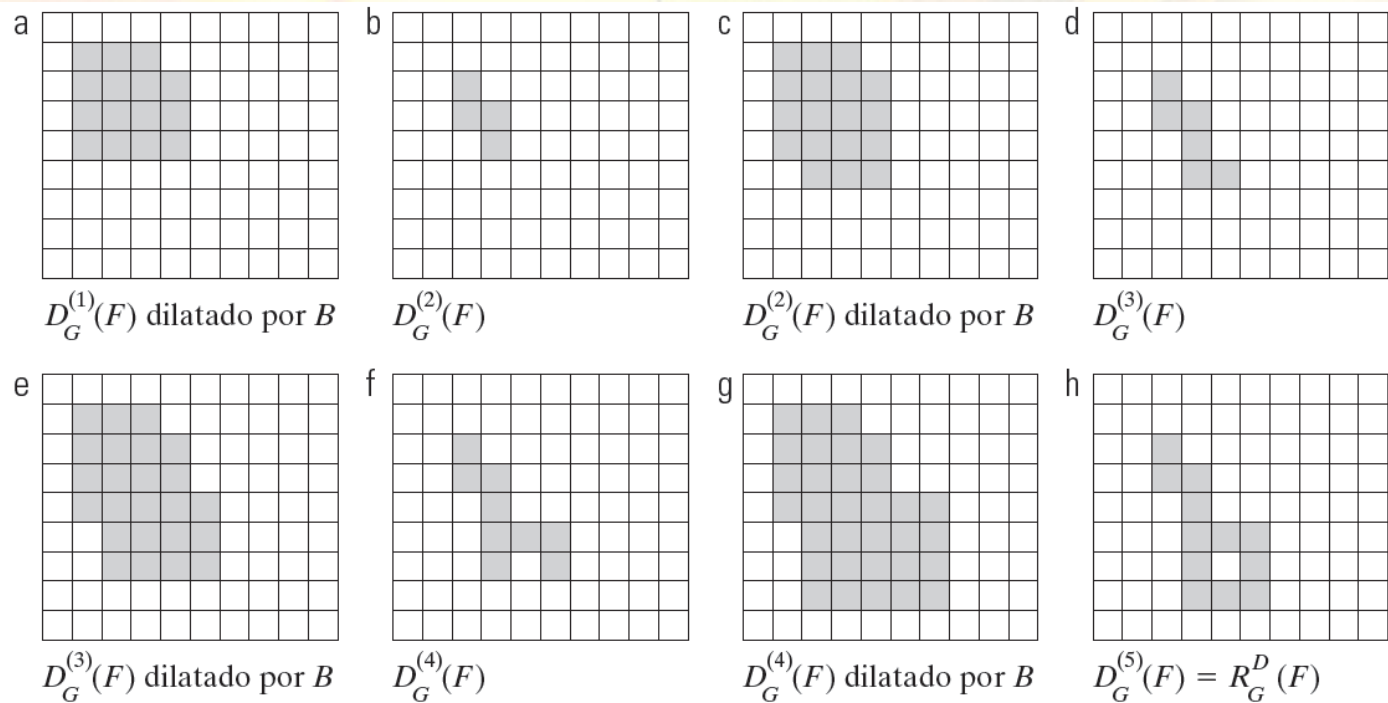


Figura 9.28 Ilustração da reconstrução morfológica por dilatação. F , G , B e $D_G^{(1)}(F)$ são da Figura 9.26.

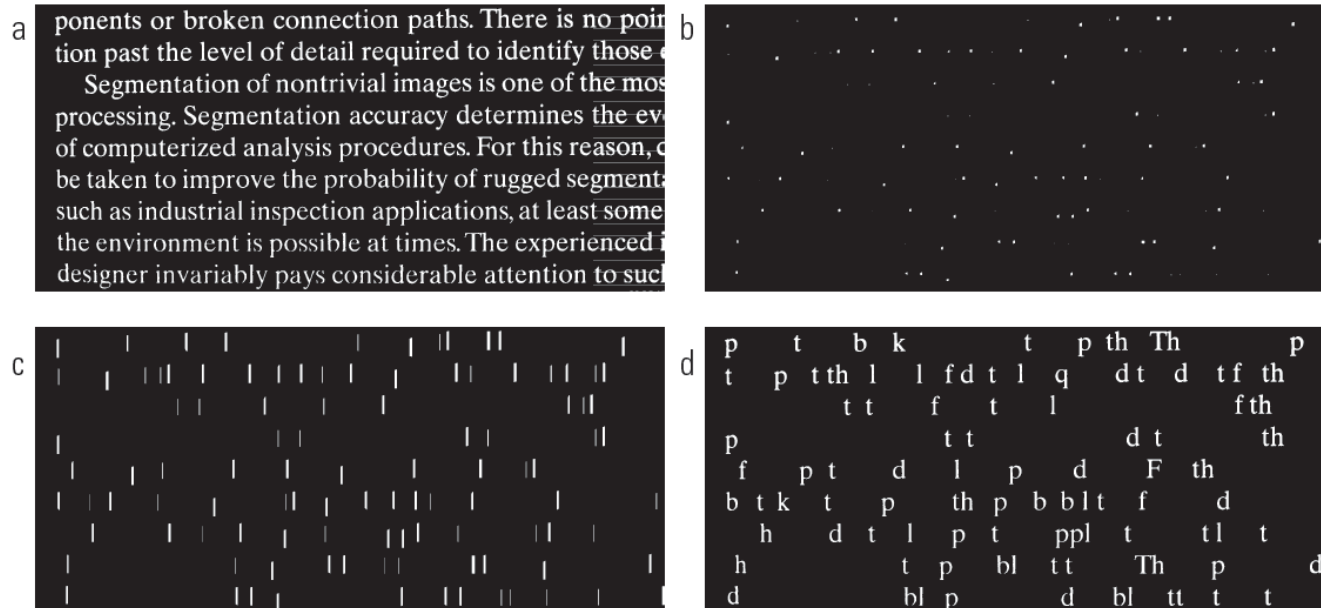


Figura 9.29 (a) Imagem de texto de tamanho 918×2.018 pixels. A altura média aproximada dos caracteres é de 50 pixels. (b) Erosão de (a) por um elemento estruturante de tamanho 51×1 pixels. (c) Abertura de (a) com o mesmo elemento estruturante, mostrado apenas como referência. (d) Resultado de abertura por reconstrução.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

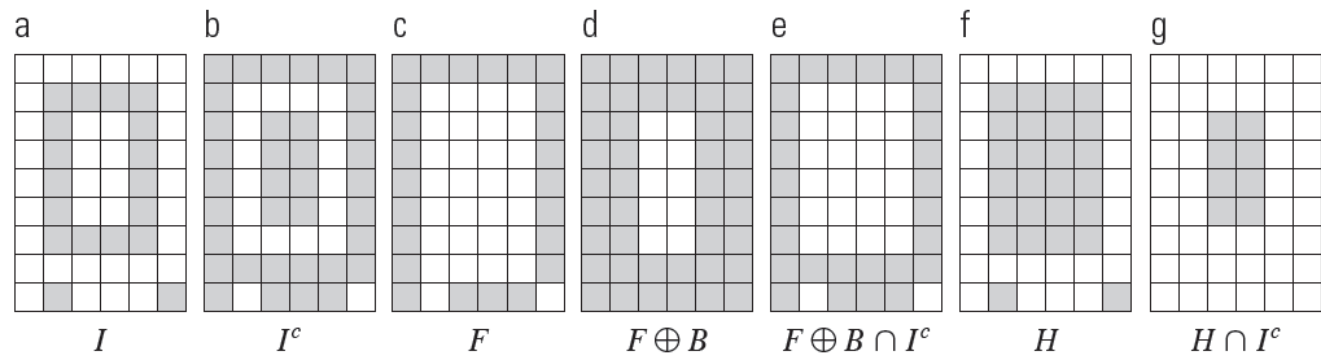


Figura 9.30 Ilustração do preenchimento de buracos em uma imagem simples.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

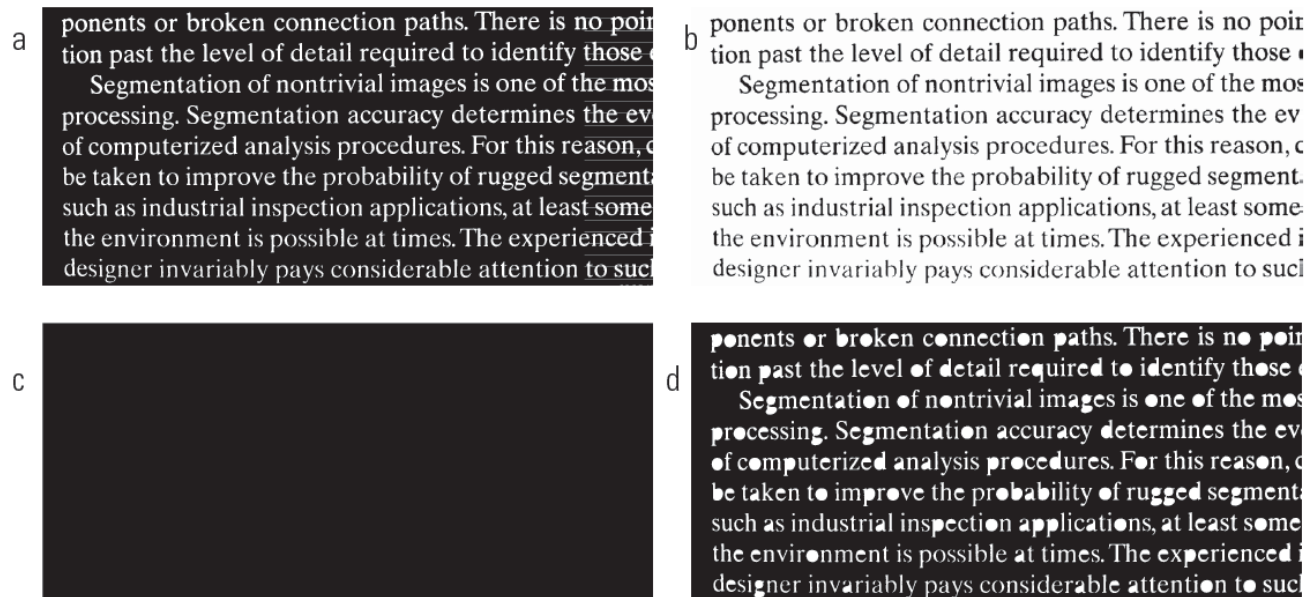


Figura 9.31 (a) Imagem de texto de tamanho 918×2.018 pixels. (b) Complemento de (a) para uso como uma imagem de máscara. (c) Imagem do marcador. (d) Resultado do preenchimento de buracos usando a Equação 9.5-29.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

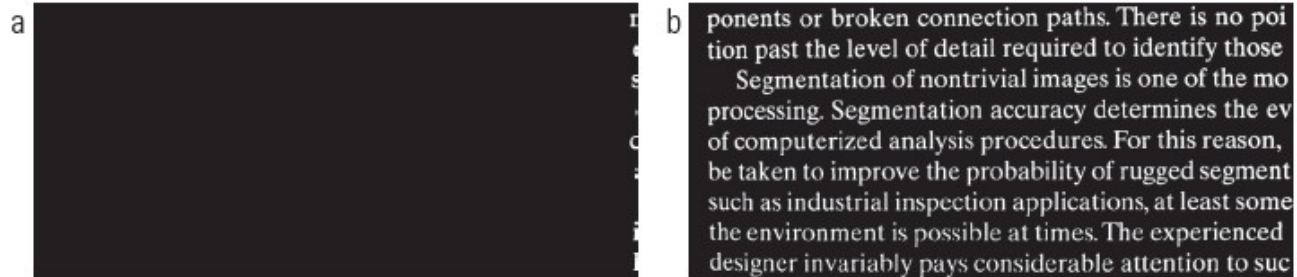


Figura 9.32 Limpeza das bordas. (a) Imagem do marcador. (b) Imagem sem objetos tocando a borda. A imagem original é a da Figura 9.29(a).

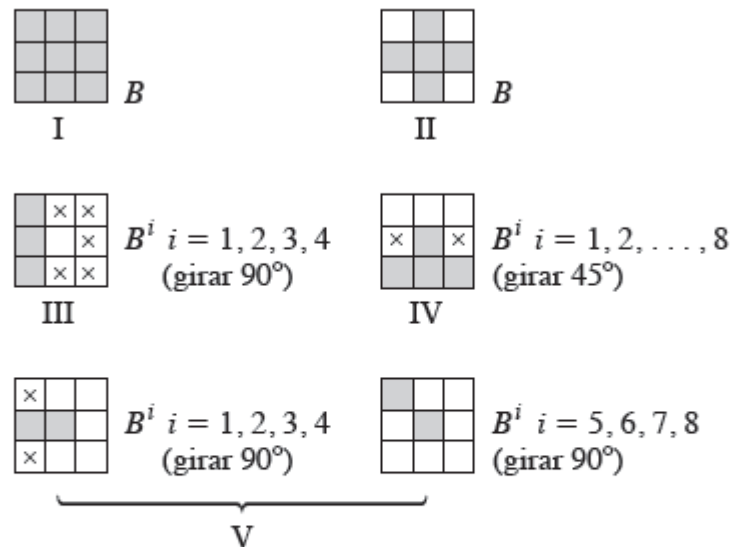


Figura 9.33 Cinco tipos básicos de elementos estruturantes utilizados para a morfologia binária. A origem de cada elemento está em seu centro e os \times 's indicam os valores "não importa".

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Tabela 9.1 Resumo das operações morfológicas e suas propriedades.

Operação	Equação	Comentários (os algoritmos romanos referem-se aos elementos estruturantes na Figura 9.33)
Translação	$(B)_z = \{\omega \omega = b + z, \text{ para } b \in B\}$	Translada a origem de B para o ponto z .
Reflexão	$\hat{B} = \{\omega \omega = -b, \text{ para } b \in B\}$	Reflete todos os elementos de B em torno da origem desse conjunto.
Complemento	$A^c = \{\omega \omega \notin A\}$	Conjunto de pontos que não pertencem a A .
Diferença	$A - B = \{\omega \omega \in A, \omega \notin B\}$ $= A \cap B^c$	Conjunto de pontos que pertencem a A mas não a B .
Dilatação	$A \oplus B = \{z (\hat{B}_z) \cap A \neq \emptyset\}$	"Expand" a fronteira de A . (I)
Erosão	$A \ominus B = \{z (B)_z \subseteq A\}$	"Contra" a fronteira de A . (I)
Abertura	$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$	Suaviza os contornos, quebra os istmos e elimina as pequenas ilhas e os picos agudos. (I)
Fechamento	$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$	Suaviza os contornos, funde pequenas quebras, alonga os golfs finos e elimina pequenos buracos. (I)
Transformada <i>hit-or-miss</i>	$A \otimes B = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2)$ $= (A \ominus B_1) - (A \oplus B_2)$	Conjunto de pontos (coordenadas) em que, simultaneamente, B_1 encontra um acerto (<i>hit</i>) em A e B_2 encontra um acerto em A^c .
Extração de fronteiras	$\beta(A) = A - (A \ominus B)$	Conjunto de pontos na fronteira do conjunto A . (I)
Preenchimento de buracos	$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A;$ $k = 1, 2, 3, \dots$	Preenche os buracos em A ; X_0 = arranjo matricial de 0s com um 1 em cada buraco. (II)
Componentes conexos	$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A;$ $k = 1, 2, 3, \dots$	Localiza os componentes conexos em A ; X_0 = arranjo matricial de 0s com um 1 em cada componente conexo. (I)
Fecho convexo	$X_k^i = (X_{k-1}^i \otimes B^i) \cup A;$ $i = 1, 2, 3, 4;$ $k = 1, 2, 3, \dots;$ $X_0^i = A;$ e $D^i = X_{conv}^i$	Localiza o fecho convexo $C(A)$ do conjunto A , no qual "conv" indica convergência no sentido de que $X_k^i = X_{k-1}^i$ (III)
Afinamento	$A \otimes B = A - (A \oplus B)$ $= A \cap (A \oplus B)^c$ $A \otimes \{B\} = ((\dots((A \otimes B^1)$ $\otimes B^2) \dots) \otimes B^n)$ $\{B\} = \{B^1, B^2, B^3, \dots, B^n\}$	Afina o conjunto A . As duas primeiras equações oferecem a definição básica de afinamento. As últimas equações denotam o afinamento por uma sequência de elementos estruturantes. Este método é normalmente utilizado na prática. (IV)
Espessamento	$A \odot B = A \cup (A \otimes B)$ $A \odot \{B\} = ((\dots((A \odot B^1)$ $\odot B^2) \dots) \odot B^n)$	Engrossa o conjunto A . (Veja os comentários anteriores sobre as sequências de elementos estruturantes) Usa IV com 0s e 1s revertido.

(continua)

Tabela 9.1 Resumo das operações morfológicas e suas propriedades. (continuação)

Operação	Equação	Comentários (os algarismos romanos referem-se aos elementos estruturantes na Figura 9.33)
Esqueletos	$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A)$ $S_k(A) = \bigcup_{k=0}^K \{(A \ominus kB)\}$ $- [(A \ominus kB) \circ B]\}$ <p>Reconstrução de A:</p> $A = \bigcup_{k=0}^K (S_k(A) \oplus kB)$	Localiza o esqueleto $S(A)$ do conjunto A . A última equação indica que A pode ser reconstruído a partir dos subconjuntos de esqueleto $S_k(A)$. Em todas as três equações, K é o valor do passo iterativo após o qual o conjunto A se torna um conjunto vazio. A notação $(A \ominus kB)$ indica a k -ésima iteração de erosões sucessivas de A por B . (I)
Poda	$X_1 = A \otimes \{B\}$ $X_2 = \bigcup_{k=1}^8 (X_1 \oplus B^k)$ $X_3 = (X_2 \oplus H) \cap A$ $X_4 = X_1 \cup X_3$	X_1 é o resultado da poda do conjunto A . O número de vezes que a primeira equação é aplicada para obter X_1 deve ser especificado. Os elementos estruturantes ∇ são utilizados para as duas primeiras equações. Na terceira equação, H refere-se ao elemento estruturante I .
Dilatação geodésica de tamanho 1	$D_G^{(1)}(F) = (F \oplus B) \cap G$	F e G são chamados de imagens do <i>marcador</i> e de <i>máscara</i> , respectivamente.
Dilatação geodésica de tamanho n	$D_G^{(n)}(F) = D_G^{(1)}[D_G^{(n-1)}(F)];$ $D_G^{(0)}(F) = F$	
Erosão geodésica de tamanho 1	$E_G^{(1)}(F) = (F \ominus B) \cup G$	
Erosão geodésica de tamanho n	$E_G^{(n)}(F) = E_G^{(1)}[E_G^{(n-1)}(F)];$ $E_G^{(0)}(F) = F$	
Reconstrução morfológica por dilatação	$R_G^D(F) = D_G^{(k)}(F)$	k é tal que $D_G^{(k)}(F) = D_G^{(k+1)}(F)$
Reconstrução morfológica por erosão	$R_G^E(F) = E_G^{(k)}(F)$	k é tal que $E_G^{(k)}(F) = E_G^{(k+1)}(F)$
Abertura por reconstrução	$O_R^{(n)}(F) = R_F^D[(F \ominus nB)]$	$(F \ominus nB)$ indica n erosões de F por B .
Fechamento por reconstrução	$C_R^{(n)}(F) = R_F^E[(F \oplus nB)]$	$(F \oplus nB)$ indica n dilatações de F por B .
Preenchimento de buracos	$H = [R_F^D(F)]^c$	H é igual à imagem de entrada I , mas com todos os buracos preenchidos. Veja a Equação 9.5-28 para a definição da imagem do marcador F .
Limpeza das bordas	$X = I - R_F^D(F)$	X é igual à imagem de entrada I , mas todos os objetos que tocam (estão conectados) a borda da imagem são removidos. Veja a Equação 9.5-30 para a definição da imagem do marcador F .

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

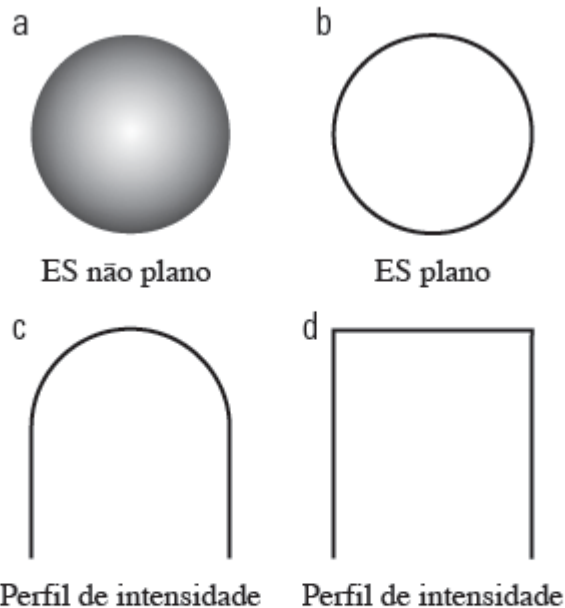


Figura 9.34 Os elementos estruturantes não planos e planos, e os correspondentes perfis de intensidade horizontal que passam através de seu centro. Todos os exemplos apresentados nesta seção baseiam-se em elementos estruturantes planos.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

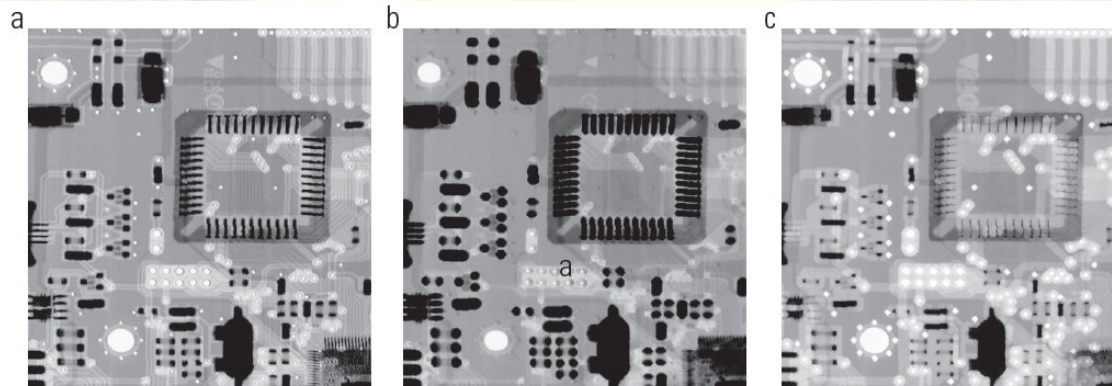


Figura 9.35 (a) Uma imagem radiográfica em níveis de cinza 448×425 pixels. (b) Erosão usando um disco plano com um raio de 2 pixels. (c) Dilatação usando o mesmo ES. (Imagem original cortesia da Lixi, Inc.)

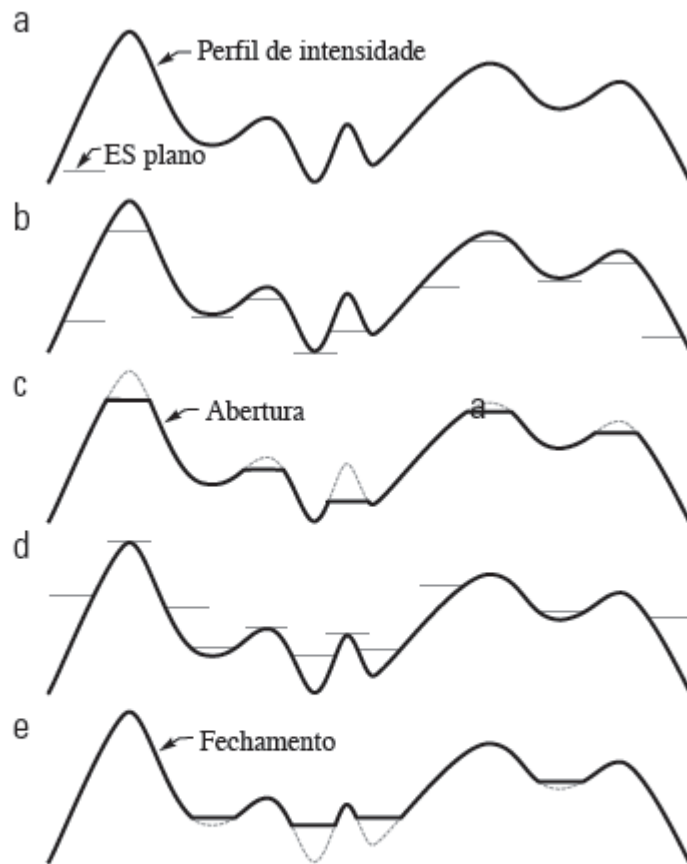


Figura 9.36 Abertura e fechamento em uma dimensão. (a) Sinal original 1-D. (b) Elemento estruturante plano sob o sinal empurrado de baixo para cima. (c) Abertura. (d) Elemento estruturante plano sobre sinal empurrado de cima para baixo. (e) Fechamento.

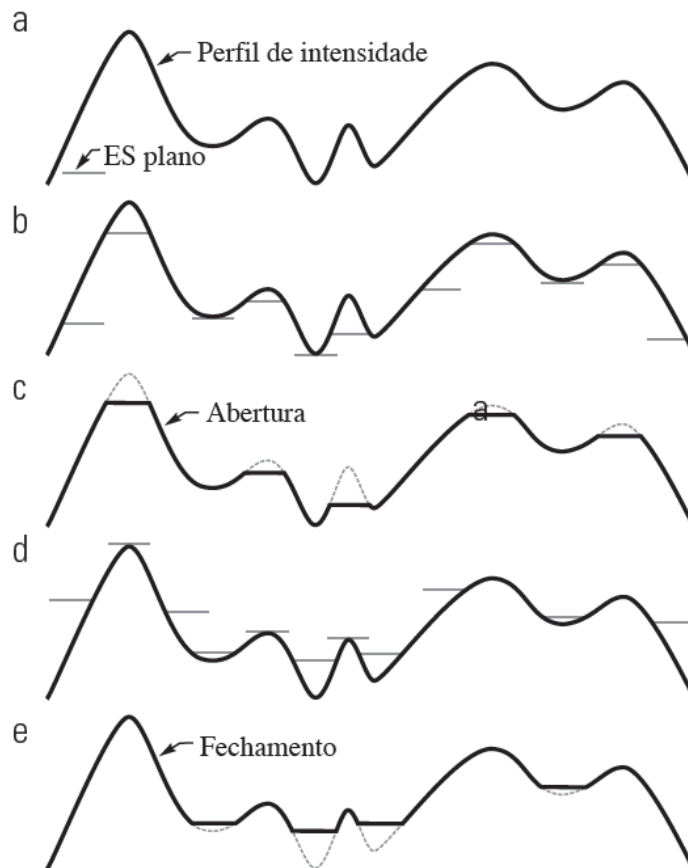


Figura 9.36 Abertura e fechamento em uma dimensão. (a) Sinal original 1-D. (b) Elemento estruturante plano sob o sinal empurrado de baixo para cima. (c) Abertura. (d) Elemento estruturante plano sobre sinal empurrado de cima para baixo. (e) Fechamento.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

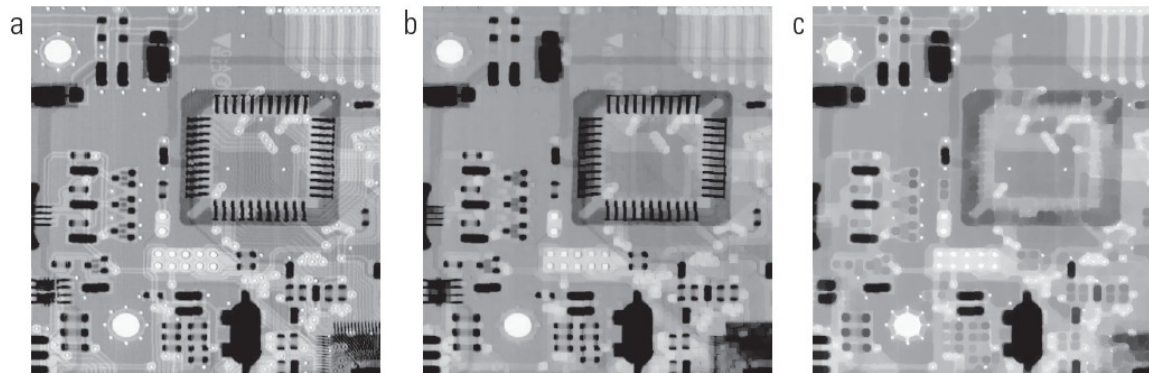


Figura 9.37 (a) Imagem radiográfica em níveis de cinza de tamanho 448×425 pixels. (b) Abertura usando um ES em forma de disco com um raio de 3 pixels. (c) Fechamento usando um ES de raio 5.

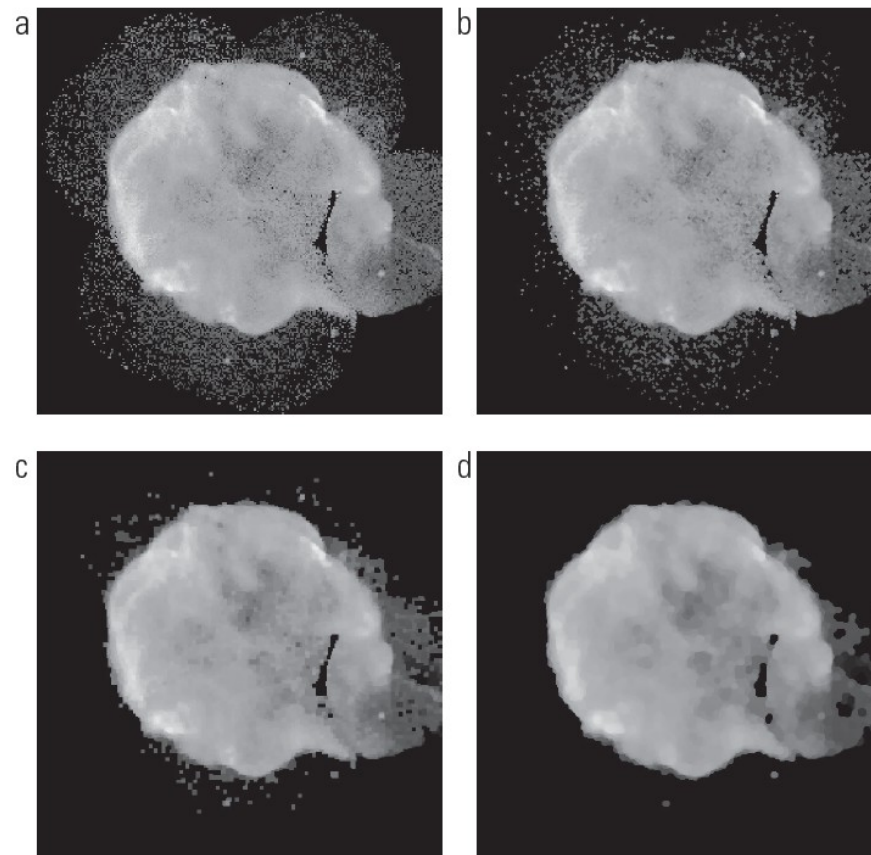


Figura 9.38 (a) Imagem de 566×566 da supernova *Cygnus Loop*, adquirida na banda de raios X pelo telescópio Hubble da Nasa. (b) a (d) Resultados da realização da sequência abertura-fechamento na imagem original, com elementos estruturantes no forma de disco de raios 1, 3 e 5, respectivamente. (Imagem original: cortesia da Nasa.)

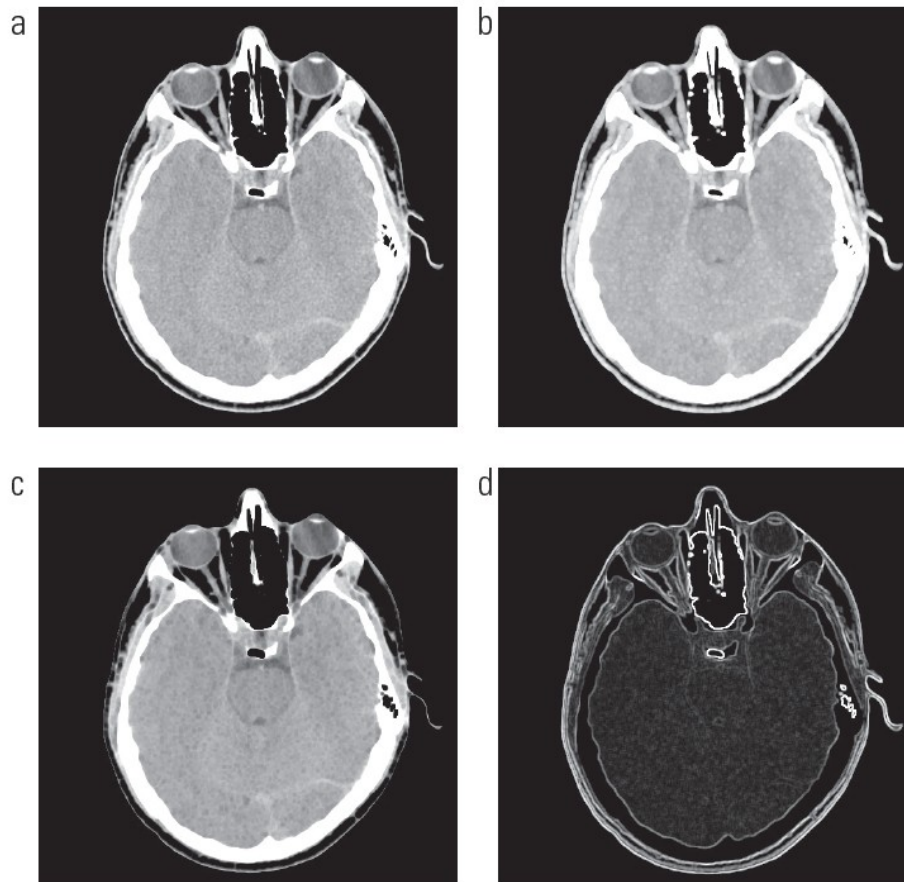


Figura 9.39 (a) Imagem 512×512 de uma tomografia computadorizada da cabeça. (b) Dilatação. (c) Erosão. (d) Gradiente morfológico, calculado como a diferença entre (b) e (c). (Imagem original: cortesia do Dr. David R. Pickens, Universidade de Vanderbilt.)

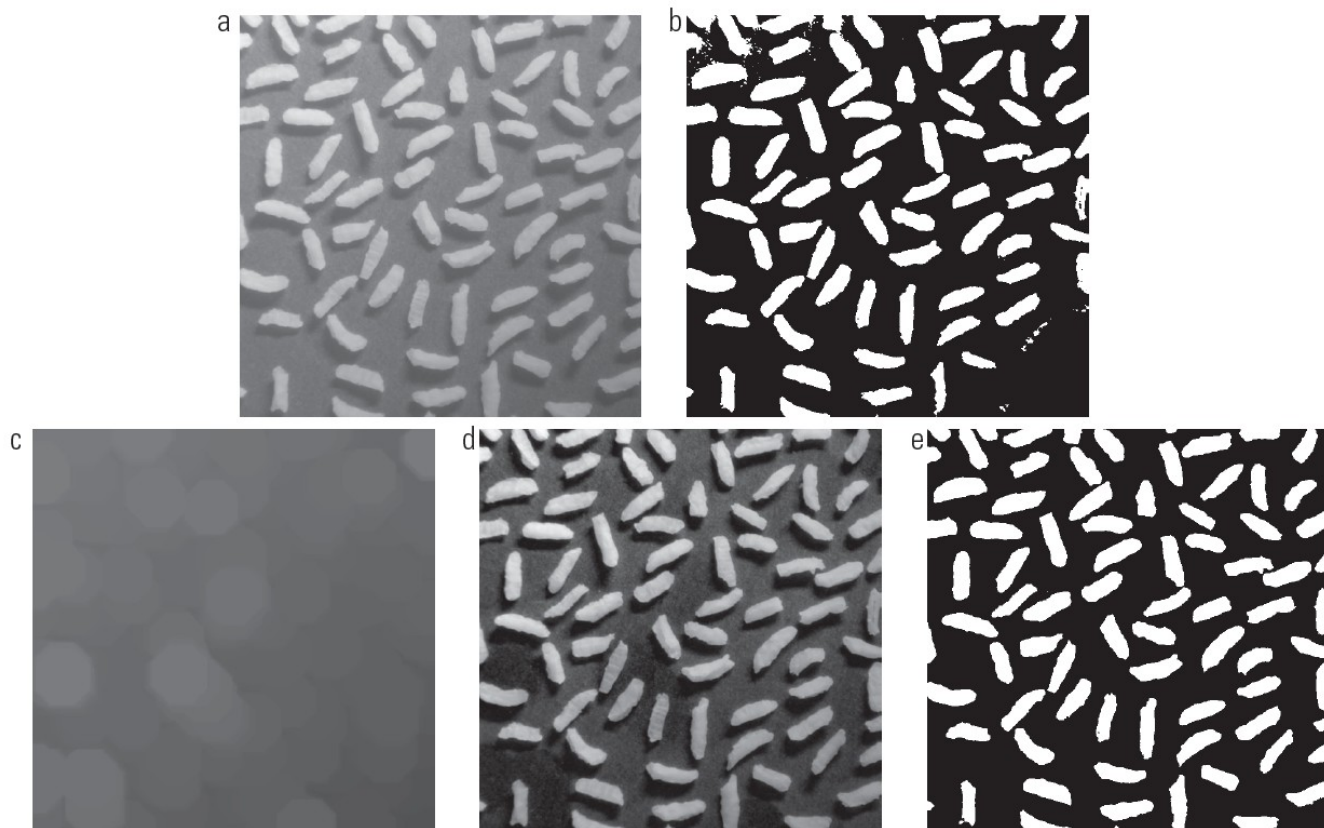


Figura 9.40 Usando a transformada *top-hat* para a *correção de sombreamento*. (a) Imagem original de tamanho 600×600 pixels. (b) Imagem após a limiarização. (c) Imagem aberta usando um ES em forma de disco de raio 40. (d) Transformada *top-hat* (a imagem menos a sua abertura). (e) Imagem *top-hat* após a limiarização.

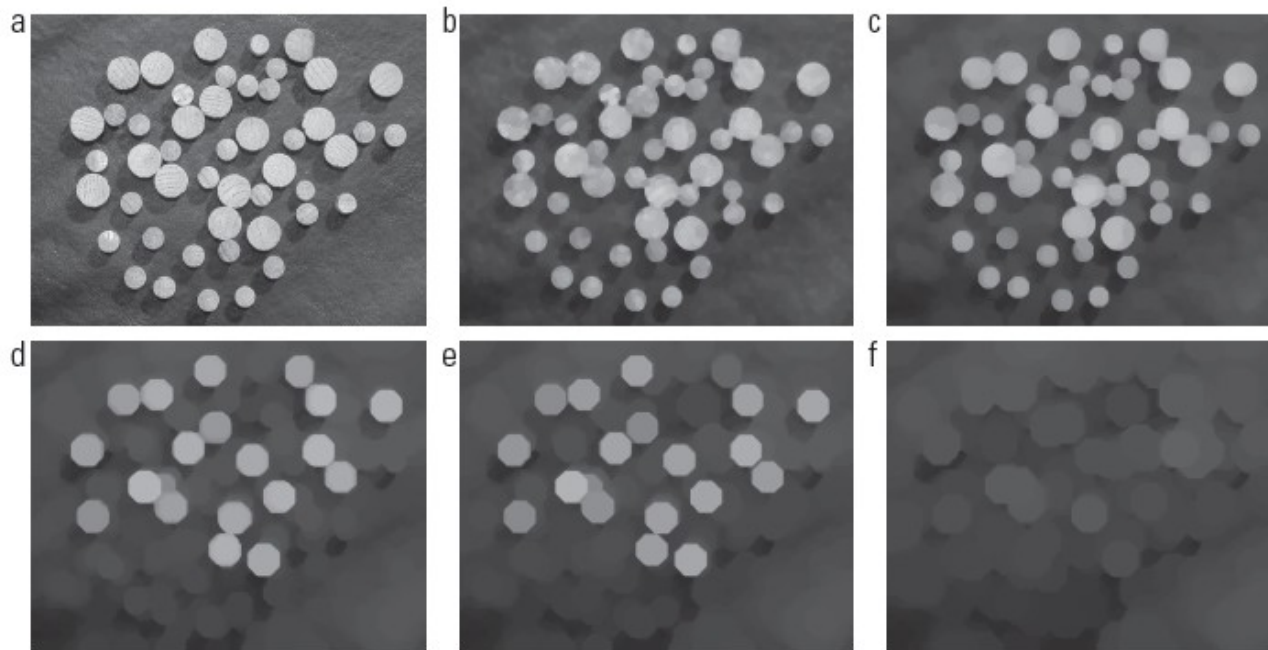


Figura 9.41 (a) Imagem de tamanho 531×675 de pinos de madeira. (b) Imagem suavizada. (c) a (f) Aberturas de (b) com discos de raios iguais a 10, 20, 25 e 30 pixels, respectivamente. (Imagem original: cortesia do Dr. Steve Eddins, The MathWorks, Inc.)

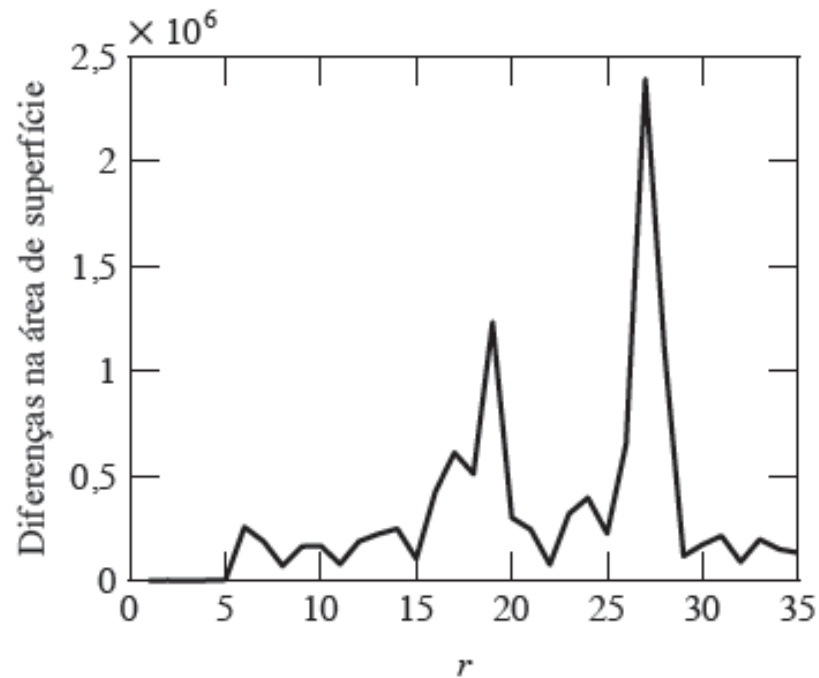


Figura 9.42 Diferenças na área de superfície em função do raio do disco do ES, r . Os dois picos são indicativos de dois tamanhos de partículas dominantes na imagem.

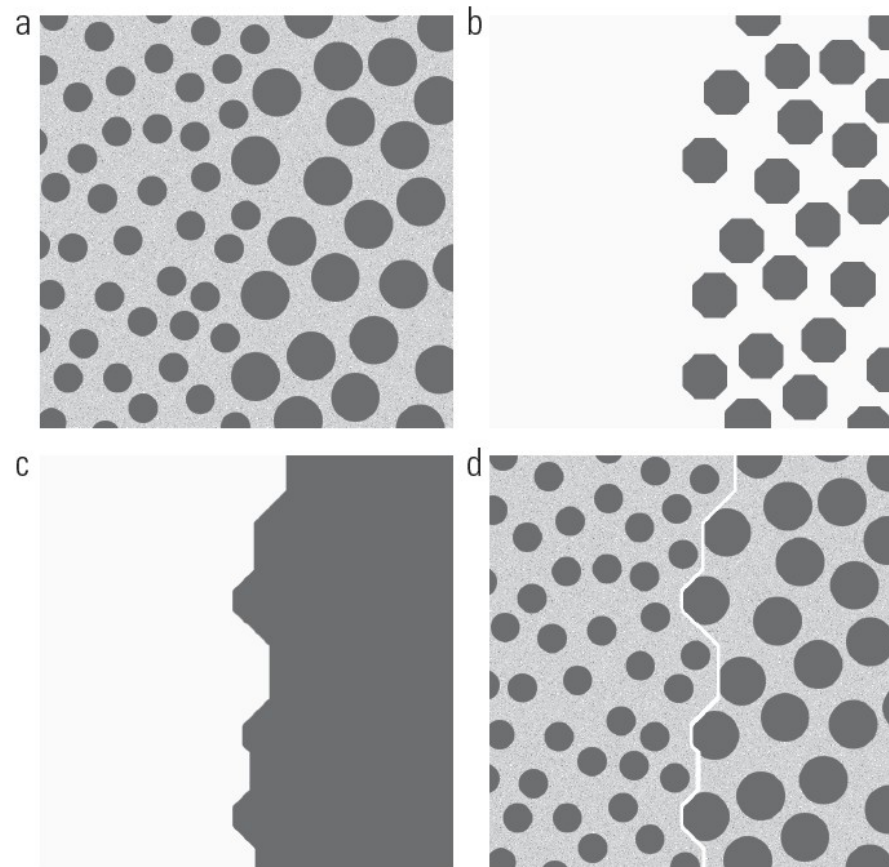


Figura 9.43 Segmentação de texturas. (a) Uma imagem 600×600 que consiste de dois tipos de bolhas. (b) Imagem com pequenas bolhas removidas pelo fechamento de (a). (c) Imagem cujos espaços claros entre as grandes bolhas foram removidos efetuando a abertura de (b). (d) Imagem original com a fronteira entre as duas regiões em (c) sobrepostas. A fronteira foi obtida por uma operação de gradiente morfológico.

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS



Figura 9.44 (a) Imagem original de tamanho 1.134×1.360 pixels. (b) Abertura por reconstrução de (a) usando uma linha horizontal de 71 pixels de comprimento na erosão. (c) Abertura de (a) utilizando a mesma linha. (d) *Top-hat* por reconstrução. (e) *Top-hat*. (f) Abertura por reconstrução de (d) usando uma linha horizontal de 11 pixels de comprimento. (g) Dilatação de (f) usando uma linha horizontal de 21 pixels de comprimento. (h) Mínimo de (d) e (g). (i) Resultado final da reconstrução. (Imagem original: cortesia do Dr. Steve Eddins, The MathWorks, Inc.)