

Utilização de Imagens Monocromáticas com Grãos Sobrepostos na Avaliação da Geometria dos Meios Porosos

Aura Conci, Inhaúma Neves Ferraz, Ana Cristina Bicharra Garcia,
Evelyn de Almeida Vieira* e Rafael Heitor Correia de Melo*

Depto de Ciências de Computação, IC, UFF- Universidade Federal Fluminense,

Rua Passo da Pátria 156, 24210 -240, Niterói, RJ

E-mails: aconci@ic.uff.br, ferraz@dcc.ic.uff.br, bicharra@dcc.ic.uff.br,

evelyn@addlabs.uff.br, heitor@addlabs.uff.br

Resumo

No reconhecimento por imagens, a maioria das aplicações precisa caracterizar os objetos pela sua forma, definindo relações entre elementos e suas partes (sua morfologia). A morfologia matemática é a metodologia mais adequada para quantificar e qualificar os grãos e os elementos presentes nas imagens, podendo ser utilizada para imagens em tons de cinza ou binárias. Este trabalho considera os fundamentos teóricos da morfologia matemática em tons de cinza, utilizados na implementação de um sistema de caracterização de grãos por imagens. Discute-se por exemplos os limites de aplicabilidade das técnicas implementadas na resolução do problema de contagem e medição de grãos constitutivos dos meios no caso dos grãos estarem em contato ou sobrepostos, quando esses puderem ser identificados por seus tons e tamanhos.

Introdução

A contagem, identificação e a medição de elementos é fundamental em diversas aplicações, da biologia a mineralogia (figura 1), pois através da determinação das frequências e do tamanhos dos grãos presentes em amostras do material é possível conhecer suas propriedades e classificá-lo. Em petrologia, a contagem e a medição de grãos é feita através de peneiras, ou seja, fisicamente. Este trabalho surgiu da idéia de automatizar tal processo, através da análise granulométrica das imagens dos materiais a serem caracterizados.

A granulometria por imagens é uma analogia ao processo que ocorre no peneiramento físico de um material. Depois do peneiramento pela contagem ou pesagem dos materiais retidos na peneira é determinado um histograma (curva granulométrica) que relaciona o tamanho do grão com a quantidade de material. Assim, uma definição adequada do tamanho do grão presente no material depende, não só do próprio material mas também do conjunto de peneiras usadas.

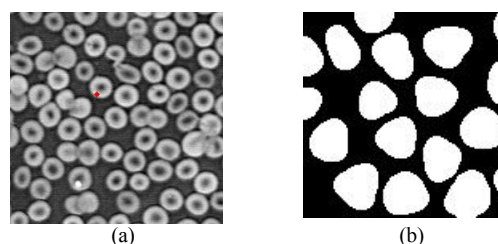


Figura 1: Imagens reais a serem analisadas: lâminas de células em tons de cinza (a) e grãos de formas irregulares preto-e-brancos (b).

Neste trabalho, prossegue-se no aprimoramento de estudo iniciado no trabalho anterior [Conci et al., 2004]. Faremos na próxima seção uma apresentação dos conceitos de morfologia matemática em tons de cinza a serem utilizados. A seguir apresentaremos, idéia do algoritmo de granulometria usando imagens em tons de cinza desenvolvido. Depois comenta-se a sua utilização na identificação diferenciada dos grãos e as limitações do algoritmo implementado. Diversos exemplos para verificar as aplicabilidades do algoritmo apresentado são analisados. Finalmente trata-se dos detalhes que incluindo na análise solucionarão as limitações observadas.

Morfologia em Tons de Cinza

Considera-se que 1964 tenha sido o ano de "nascimento" da Morfologia Matemática, no campus de Fontainebleau da *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*, pois foi neste ano que Georges Matheron foi incumbido de investigar as relações entre a geometria de um meio poroso e sua permeabilidade, ao mesmo tempo que foi passado a Jean Serra a tarefa de prever as propriedades mineralógicas pela quantificação petrográfica dos minérios de ferro [Serra, 1982].

Esta teoria se baseia na idéia de que perceber uma imagem é transformá-la. É uma ferramenta muito adequada para a qualificação e quantificação das formas relevantes em uma imagem [Serra, 1982]. Seus operadores são construtivisticamente definidos para produzir determinados efeitos a partir um conjunto mínimo de operações elementares como a dilatação e a erosão [Matheron, 1975].

A morfologia matemática é uma aplicação da teoria de conjuntos, que fornece uma abordagem não linear

*Bolsistas do laboratório ADDLabs

poderosa para numerosos problemas de processamento de imagens [Soille, 1999]. Os conjuntos em morfologia matemática representam os objetos descritos na imagem. Por exemplo, cada grão é definido pelos pixels de determinado tom na imagem que estão conectados e em conjunto representam uma descrição completa dessa imagem.

Imagens digitais em níveis de cinza podem ser representadas por conjuntos cujos componentes estejam em Z^3 . Nesse caso, os dois primeiros componentes de cada elemento do conjunto se referem às coordenadas (i,j) (por convenção) dos pixels ligados ou relevantes da imagem, enquanto o terceiro corresponde ao valor discreto de intensidade ou tom de cinza. Por exemplo, se considerarmos relevantes os pixels brancos da imagem e o início dos eixos a posição superior esquerda, o conjunto da figura 2(a) pode ser descrito como $\{(2,1,3); (3,1,40); (1,4,30); (3,4,55), (1,8,120)\}$.

Um conceito importante na morfologia matemática é a definição de **elemento estruturante**. O elemento estruturante é um conjunto definido e conhecido (forma e tamanho), que é usado em uma operação com o conjunto da imagem para salientar determinado aspecto. É definido como uma imagem completamente conhecida, podendo assumir várias formas dependendo do efeito a ser obtido e sua origem é definida em qualquer ponto, embora no caso de elementos simétrico seja geralmente considerada o centro do conjunto.

No caso dos meios porosos, uma abordagem por teoria dos conjuntos também é possível. Neste caso vamos chamar de conjunto A os componentes sólidos do meio (a união de todos os grãos) e A^c sua rede de poros (pixels pretos na figura 1). Este meio será "escaneado" por uma figura B que fará o papel de uma "sonda" coletora de informações. No caso de granulometria mais do que um conjunto B pensaremos em escolher um família β de possíveis "sondas". A relação mais elementar entre esse "coletor de informações" e o meio é que B deve estar contido no conjunto de grãos do meio, isso é $B \subset A$, ou $B \cap A \neq \emptyset$ [Matheron, 1967].

O elemento estruturante usado em tons de cinza pode, como a imagem, ter seus pixels acesos em qualquer tom do intervalo de definição usado. A figura 2(b) é um exemplo de elemento estruturante com todos os tons de cinza iguais, esse tipo de elemento é chamado de elemento plano ("flat"). Fazendo um paralelo com os meios porosos, elementos estruturantes podem ser visualizados como os "coletores de informações" do meio.

Embora a morfologia matemática tenha sido desenvolvida inicialmente para imagens preto-e-brancas existem operadores em níveis de cinza análogos aos operadores da morfologia binária, entre eles, erosão, dilatação e abertura [Schouten, 2001]. Eles são similarmente úteis para identificação/remoção de objetos com certas características morfológicas. As propriedades dos operadores que valem para morfologia binária (comutatividade, idempotência,

extensividade, anti-extensividade, etc.) também valem para os equivalentes em tons de cinza [Conci et al., 2004].

Supondo que a imagem A e o elemento estruturante B tenham ambos tons com valores inteiros entre 0 e 255. A **dilatação** em tons de cinza é definida por:

$$(A \oplus B)(s,t) = \max\{ A(s-x, t-y) + B(x,y) \}$$

$$(s-x, t-y) \in D_a, (x,y) \in D_b$$

onde D_a e D_b são os domínios de A e B respectivamente. Assim pela fórmula acima a origem do elemento estruturante refletido em torno da origem [Conci et al., 2004], vai percorrer todos os pontos da imagem realizando uma operação de adição dos pixels correspondentes seguida de atribuição ao pixel operado (s,t) do valor máximo da janela $(s-x, t-y)$.

Podemos observar na figura 2(c) o resultado da dilatação. Se o elemento estruturante tem um valor uniforme, ou seja, todos os pontos do elemento que estão ligados possuem a mesma intensidade, então esta operação é equivalente a considerar o valor máximo da região da imagem, correspondente a forma definida pelo elemento estruturante, somado a este valor do elemento estruturante.

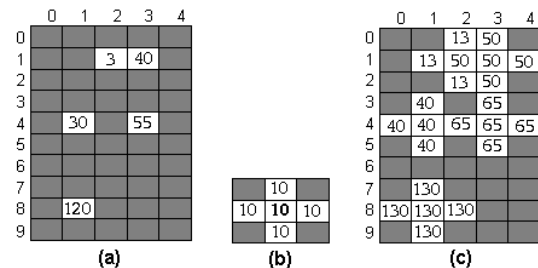


Figura 2 Exemplo de dilatação em tons de cinza: (a) imagem original, (b) elemento estruturante plano em cruz com origem no centro e (c) imagem resultante da dilatação de (a) por (b)

A operação de **erosão** em níveis de cinza tem as mesmas características da operação de erosão binária. A origem do elemento estruturante vai percorrer todos os pontos da imagem realizando uma operação de subtração seguida de atribuição ao pixel operado (s,t) do valor mínimo da janela $(s+x, t+y)$

$$(A \ominus B)(s,t) = \min\{ A(s+x, t+y) - B(x,y) \}$$

$$(s+x, t+y) \in D_a, (x,y) \in D_b$$

onde D_a e D_b são os domínios de A e B respectivamente. Assim pela fórmula acima a origem do elemento estruturante, vai percorrer todos os pontos da imagem realizando uma operação de subtração dos pixels correspondentes seguida de atribuição ao pixel operado do valor mínimo da janela (figura 3) [Conci et al., 2004].

As operações de abertura e fechamento fazem o uso das duas operações básicas da morfologia. A **abertura** é definida como uma erosão seguida de dilatação com o mesmo elemento estruturante. A operação de **fechamento** é definida como uma dilatação seguida de erosão com o mesmo elemento estruturante.

A **abertura** da imagem A pelo elemento estruturante B pode ser definida por: $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$.

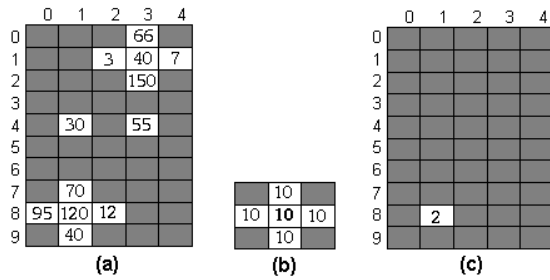


Figura 3 Exemplo de erosão em tons de cinza: (a) imagem original, (b) elemento estruturante em cruz com origem no centro e (c) imagem resultante da erosão de (a) por (b)

A abertura é **anti-extensiva** ($A \circ B \subset A$), **crescente**: se $A \subset D$ então $A \circ B \subset D \circ B$ e **idempotente** (o que quer dizer que, repetindo-se a operação mais de uma vez, não se tem mais nenhum efeito adicional, ou seja: $(A \circ B) \circ B = A \circ B$).

O **fechamento** da imagem A pelo elemento estruturante B pode ser definida por: $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$. O fechamento é **extensivo** ($A \subset A \bullet B$), **crescente**: se $A \subset D$ então $A \bullet B \subset D \bullet B$ e **idempotente**. Essa última propriedade quer dizer que, repetindo-se a operação mais de uma vez, não se tem mais nenhum efeito adicional, ou seja: $(A \bullet B) \bullet B = A \bullet B$.

Aos pares as operações de dilatação/erosão e abertura/fechamento são duais em relação ao complemento e reflexão em torno da origem [Conci et al., 2004]. Essa observação é muito importante e permite construir uma **granulometria por abertura** e uma **anti-granulometria** ou granulometria por fechamento. A combinação de ambas é que vai, em alguns casos, permitir uma definição precisa do diâmetro e outras medidas dos conjunto em análise. Essa dualidade significa que:

$$(A \ominus B)^c = A^c \oplus \hat{B} \quad \text{e} \quad (A \bullet B)^c = A^c \circ \hat{B}$$

onde \hat{B} é a **reflexão** em torno da origem de um conjunto B : $\hat{B} = \{x \mid x = -b, \text{ para } b \in B\}$ e A^c denota o **complemento** de um conjunto A em relação ao espaço subjacente: $A^c = \{x \mid x \notin A\}$.

A **reconstrução morfológica** é uma das operações mais poderosas da morfologia matemática. Ela acrescenta ao conjunto de operadores o conceito de conectividade. Em imagens preto-e-brancas essa operação identifica todos os elementos do conjunto conectados a um ponto ou conjunto de pontos definidos anteriormente, que na linguagem desta teoria é denominado **marcador**. O conjunto de pontos conectados a esse ponto encontrado é denominado de **reconstrução da imagem** inicial a partir do marcador definido.

Assim, em "linguagem de conjuntos", reconstrução morfológica de um conjunto, A , a partir de um subconjunto, $C \subset A$, é a união dos componentes

convexos de A que contém no mínimo um ponto em C . O subconjunto C que dá início a reconstrução de A é chamado de **marcador da reconstrução**.

A reconstrução é realizada a partir de uma sequência infinita de dilatações do marcador com um elemento estruturante e interseções do resultado com a imagem inicial até obter-se um resultado estável (idempotente).

Essa dilatação seguida de interseção é chamada de **dilatação condicional**. Como exemplo, suponha que o marcador seja os pixels das bordas da imagem 1(b), mostrados na figura 4(a), para melhor ilustrar, marcados por uma linha vermelha. A reconstrução desta imagem a partir deste conjunto marcador resulta nos semi-grãos que foram cortados no processo de aquisição da imagem mostrados na figura 4(b). É possível então subtrair-se a imagem original da imagem reconstruída a partir dos marcadores para obter-se uma imagem sem grãos cortados, figura 4(c).

Uma utilidade imediata desta operação num processo de granulometria automático é a eliminação de grãos não inteiros. Esses se deixados na imagem a ser analisada iriam influenciar no processo de granulometria por serem automaticamente interpretados como grãos menores.

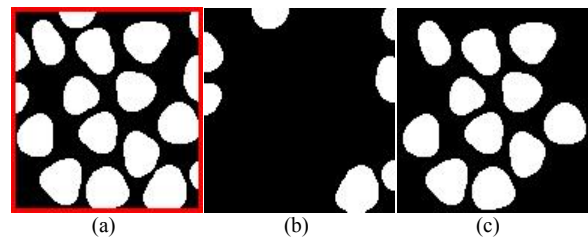


Figura 4: Exemplo de reconstrução (a) imagem original com os marcadores compondo a borda da imagem salientados apenas para ilustração; (b) resultado do processo de reconstrução a partir dos marcadores; e (c) a imagem só com os grãos inteiros, resultado da subtração de (a) por (b) [Schouten,2001].

A reconstrução tem todas as propriedades da abertura: é idempotente, crescente e anti-extensiva. Sendo uma abertura algébrica. A escolha dos marcadores é uma questão importante e deles depende o resultado obtido. Na próxima seção os marcadores são definidos a partir de aberturas da imagem e a reconstrução será usada para só se considerar grãos inteiros em um processo de "peneiramento". A reconstrução em tons de cinza é uma operação fundamental no projeto de filtragem conectada [Schouten,2001].

A abertura, o fechamento e a reconstrução morfológica para imagens em tons de cinza funcionam da mesma forma que a abertura para imagens binárias. A única diferença é que, por ser em tons de cinza, ela utiliza a erosão e a dilatação em tons de cinza, e o conjunto marcador serão pixels definidos no nível máximo (255 neste caso).

Granulometria em Tons de Cinza

A contagem e medição de grãos (granulometria), problema considerado neste artigo pode ser tratado

usando morfologia matemática, pois, através desse método, podemos simular o processo de peneiramento. Para isto utilizamos “peneiras virtuais”, onde processamos uma imagem por uma “família” de elementos estruturantes. (λ, B) . Essa família é definida pela multiplicação de todos os elementos de B por um número positivo λ , de forma a produzir um conjunto contínuo $\lambda B = \{ \lambda x, x \in B \}$.

O resultado dessa contagem é resumido na curva granulométrica ou histograma de distribuição de tamanhos, que é uma função do número de grãos pelos seus respectivos tamanhos geralmente representados pelo seu diâmetro, ou sua classe ϕ .

Essa curva granulométrica pode ser aproximada pela operação de abertura da imagem por uma família de elementos estruturantes (λ, B) . (conjunto de aberturas crescentes de tamanho $\lambda=2, 3, 4, \dots$ onde B seria o elemento estruturante inicial e λB pode ser, entendido como uma medida do tamanho do elemento estruturante). À medida que aplicamos esta sequência de aberturas na imagem, os grãos vão diminuindo até eventualmente desaparecer.

Estas operações de abertura e posterior reconstrução dos grãos restante correspondem à passagem da imagem por “peneiras virtuais”. Pode-se fazer uma analogia entre a forma e o tamanho do elemento estruturante usado na abertura com às formas e tamanhos das malha desta peneira. Conforme os grãos presentes na imagem vão passando por estas malhas “virtuais”, na imagem eles irão desaparecendo. Após a aplicação da abertura com um determinado elemento estruturante, é feita uma subtração entre a imagem do passo anterior e atual e os **grãos inteiros** que desaparecem neste passo vão sendo marcados com o tamanho λ do elemento estruturante λB .

Para uma família de elementos estruturantes convexas (λ, B) , um sub-conjunto A do espaço Euclidiano $E=\mathbb{R}^d$ e para $\lambda > 0$, uma granulometria é definida como o mapeamento $\lambda \rightarrow \psi_\lambda(A)$ onde

$$\psi_\lambda(A) = A \circ \lambda B = \cup \{ \lambda B_x, x \in E, \lambda B_x \subset A \}.$$

Uma granulometria ψ_λ deve satisfazer as condições [Matheron, 1975]:

- 1- $\psi_0(A) = A$, e se $\lambda \geq \mu$ então $\psi_\lambda(A) \subset \psi_\mu(A)$.
- 2- Para $\lambda \geq 0$ e $C \subset D$, $\psi_\lambda(C) \subset \psi_\lambda(D)$.
- 3- Para $\lambda \geq \mu \geq 0$, $\psi_\lambda(\psi_\mu(A)) = \psi_\mu(\psi_\lambda(A)) = \psi_\lambda(A)$

A primeira propriedade indica que os conjuntos transformados tem cada vez menos material. A segunda propriedade indica que o resultado de uma parte do conjunto deve estar contido no resultado do todo. É um aspecto importante no caso de usar-se amostras com níveis de resolução diversas, pois partes do solo devem estar contidas na representação do todo. A terceira propriedade considera que o resultado de duas operações com aberturas consecutivas deve produzir o mesmo resultado independente na ordem em que é feito, e igual ao resultado do último peneiramento.

Nas figuras 5 a 7, exemplifica-se o funcionamento do algoritmo de granulometria através de um exemplo. Para simplificar as imagens, todos os pixels brancos são considerados como sendo do tom 255 e este valor é omitido nas figuras 5 e 6. Consideramos a imagem da figura 5(a) como entrada do algoritmo, e a família λB como um conjunto de elementos estruturantes de formas quadradas e tom constante 1, sendo λ o tamanho deste elemento. O algoritmo começa aplicando uma abertura com um elemento estruturante 2x2. O resultado desta abertura pode ser visualizado na figura 5(b), onde são eliminados todos os grãos e partes de grãos onde esse elemento não se encaixa.

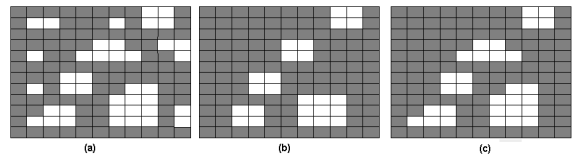


Figura 5: Exemplicando as etapas da granulometria: (a) Imagem original, (b) Imagem com abertura por elemento quadrado 2x2, (c) Imagem final da primeira etapa: resultante de um processo de reconstrução dos grãos.

O resultado da abertura da imagem pelo elemento λB é usado em um processo de reconstrução dos grãos ou subtração condicional. Essa reconstrução é feita considerando se alguns vizinho aos pixels que restaram na imagem 5(b) estavam presentes na imagem original. Os vizinhos considerados podem ser os 4-pixels conectado a cada um dos pixels acessos ou os 8 pixels vizinhos a esses pixels. Esse processo de definição da vizinhança pode ser associado ao uso de elementos estruturantes 3x3 em cruz ou 3x3 quadrados, respectivamente [Conci et al., 2004].

A reconstrução corresponde a dilatação da imagem 5(b) pelo elemento estruturante seguida de interseção com a imagem original, até a idempotência (o que geralmente é conseguido em apenas duas passadas). O resultado da reconstrução corresponde a imagem 5(c), onde tem-se "inteiros" todos os grãos que ficaram retidos na "peneira". Depois fazendo-se a subtração do conjunto da figura 5(a) pelo da figura 5(c) pode-se obter o número de pixels que desapareceram neste primeiro passo. Eles são marcados em uma imagem inicialmente vazia, que será a imagem de saída do algoritmo, como podemos observar na figura 6(c), ou será usada para gerar o gráfico da figura 7 (onde o valor do lado λ do elemento estruturante, λB , será usado no eixo horizontal e na vertical tem-se o número de pixels que desaparecerem na iteração)

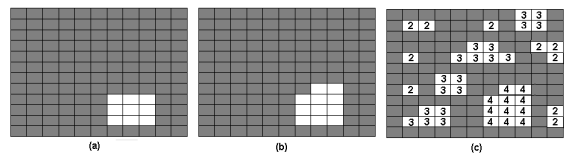
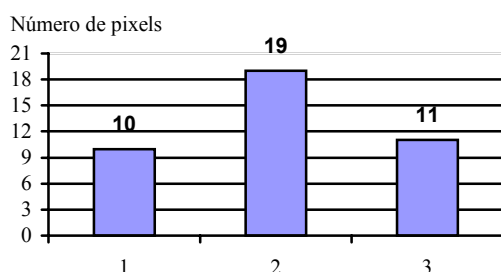


Figura 6: Continuando a exemplificar as etapas da granulometria: (a) Imagem resultante da abertura por elemento quadrado 3x3, (b) Imagem resultante do processo de reconstrução dos grãos, e (c) imagem final com a marcação do ponto onde os pixels desapareceram.

A imagem inicial da segunda iteração é a da figura 5(c), agora a "malha virtual" cresce, ou seja, é aplicada a abertura com um elemento estruturante maior. Neste caso, o tamanho seguinte é 3x3. A figura 6(a) mostra a imagem resultante dessa abertura. Depois o grão é reconstruído obtendo-se a figura 6(b), que corresponde a esta imagem depois de aplicada a abertura. Da mesma forma que na iteração anterior, essa imagem é subtraída da imagem inicial da iteração, figura 5(c), e os pixels que desapareceram da imagem, nesta iteração, são marcados em uma imagem resultante, figura 6(c), que neste exemplo já possui inclusive as marcações da próxima iteração.

Na terceira etapa, não ilustrada, o tamanho do elemento estruturante passa a ser 4x4. A figura 6(b) é a imagem de entrada desta etapa; essa imagem depois aberta por um elemento estruturante 4x4 apresenta todos os pixels excluídos, terminando o processo. Se isto não tivesse acontecido neste momento, as etapas continuariam da mesma forma até que se chegasse a uma imagem sem nenhum pixel ligado. Como nas etapas anteriores são feitas as marcações dos pixels que desapareceram após a abertura e reconstrução.

O resultado final da granulometria [Matheron, 1975] é obtido através do gráfico da figura 7, que é calculado a partir das marcações com a etapa em que os grãos desapareceram, figura 6(c). Assim é calculado o histograma desta imagem que indicará o número de pixels que desapareceram em cada passo. Este histograma está representado na figura 7, em relação ao tamanho do elemento estruturante do passo em que os



pixels desapareceram *versus* o número de pixels a desaparecerem.

Figura 7: Histograma obtido a partir da imagem 6(c).

Depois de calculado este histograma, é necessário calcular a curva granulométrica. Se o objetivo for considerar a curva granulométrica na forma de número *versus* diâmetro de grãos, o número de pixels desaparecido em cada passo (no histograma da figura 7) deve ser dividido pela área do grão que desaparece no passo. Isto porque a abertura de uma imagem por um elemento estruturante quadrado 2x2, por exemplo, faz com que desapareçam desta imagem todos os grãos com área menor do que a área deste elemento estruturante. Como no método, utiliza-se uma sequência crescente de aberturas (2, 3, 4, ...), os grãos que somem em cada passo são sempre relacionados

com o tamanho do elemento estruturante utilizado. O resultado inteiro deste cálculo indicaria o número de grãos presentes na imagem com tamanho (diâmetro) imediatamente menor do que o valor deste passo (que corresponde ao valor do lado do elemento estruturante). Essa é a forma usada para fazer o que é chamado de granulometria por número [Conci et al., 2004]. Entretanto essa forma de definição da curva conduz a erros se, como neste exemplo, o formato dos grãos não for uniforme, pois como considerar a área do grão que se os grãos que desaparecem no passo podem ter diversas áreas.

Repare que na figura 5 ao se passar o elemento estruturante 2x2, do passo 1 desapareceram na imagem grãos com área de 1, 2 ou 3 pixels. Assim os grãos com forma de 2x1, 1x2, ou em L, presentes também "morrem", com os grãos de 1 pixel. O número de grãos seria contato errado se essas diferentes áreas fossem consideradas iguais. O mesmo ocorre em todos os passos. Ao se passar o elemento estruturante 3x3, do passo 2, vão "morrer" grãos com área de 4 a 8 pixels. E ao se passar o elemento estruturante 4x4, "morrem" grãos de áreas de 9 a 15. A relação entre o número de pixels que desaparecem na imagem e o número de grãos, não poderia ser considerado corretamente, sendo mais adequado usar-se outras formas de medidas para a granulometria, como por exemplo a área. Se fosse mesmo assim necessário uma granulometria por número seria mais adequado fala-se em faixas de valores, que valores precisos, como indicado na tabela 1 para este exemplo.

passo	pixels desaparecidos	numero aproximado de grãos:
1	10	6/1 a 6/3 - de 2 a 6 grãos
2	19	19/4 a 19/8 - de 4 a 2 grãos
3	11	11/9 a 11/15 ou seja 1 ou 0

Tabela 1: Faixa de grãos que desaparecem nas iterações do algoritmo ao ser processada a imagem da figura 5(a)

Observa-se que, com essa interpretação, é possível descrever de maneira aproximada uma curva granulométrica cujos resultados podem ser facilmente comparado com as imagens utilizadas. Assim, embora na maioria das aplicações não seja recomendado o uso de uma curva granulométrica por número essa será a forma utilizada nos exemplos deste trabalho, pela facilidade de comprovação visual dos resultados obtidos.

Resultados

A aplicação implementada para análise granulométrica foi desenvolvida em C++, empregando paradigmas da orientação a objetos. As classes que representam os filtros utilizados para o processamento das imagens foram desenvolvidos em dll's. Estas fazem uso de uma biblioteca de visualização e processamento de imagens chamada CxImage [Pizzolato, 2003], bem como de uma biblioteca de manipulação gráfica chamada GraphCtrl [Yuantu

Huang, 2000] e de uma biblioteca de desenho de tabelas chamada GridCtrl [Maunder, 2002] que serão utilizadas na exibição dos resultados. Todas essas bibliotecas são de código aberto e se encontram disponíveis na Internet.

Inicialmente foram implementadas as operações morfológicas binárias básicas (erosão e dilatação), a abertura e, posteriormente, a granulometria [Conci et al., 2004]. Como as imagens a serem analisadas neste trabalho não são binárias, pudemos observar que, ao torná-las binárias, muita informação era perdida antes do processamento como, por exemplo, informações de contorno, fazendo com que grãos que se mostravam independentes na imagem original ficassem unidos na imagem inicial utilizada como entrada para o algoritmo de granulometria. Isto pode ser observado a partir da análise da figura 8(a) e de sua imagem binária correspondente, figura 8(b).

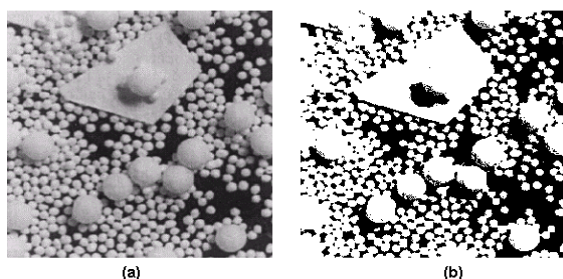


Figura 8: Exemplo de imagem granular: (a) Imagem original e (b) Imagem binarizada

Deste modo, como a morfologia matemática binária não se mostrou uma boa solução para imagens em tons de cinza, optou-se por implementar os operadores da morfologia matemática em tons de cinza, o que faz com que a imagem de entrada do algoritmo perca menos informação antes de ser processada.

Com relação ao elemento estruturante, neste algoritmo inicial, fizemos vários testes quanto à sua forma e quanto aos valores de suas intensidades. Inicialmente, utilizamos somente o elemento estruturante quadrado e variamos os valores das intensidades, começando de 1. Um valor que se mostrou interessante nos testes foi o de intensidade 50 para representar os pixels ligados do elemento estruturante. Depois foram testados elementos estruturantes com formatos de círculo e losango (com todos os ângulos iguais). Isto foi feito para permitir que grãos com estas formas fossem detectados com mais facilidade. Assim, ao se iniciar o processo da granulometria, o usuário tem a opção de definir a forma que melhor representa os grãos presentes na imagem. Como veremos a seguir a forma da família usada nas aberturas é um aspecto fundamental.

Para validar o algoritmo proposto, executamos a granulometria em imagens com resultado facilmente verificáveis (número de formas e seus respectivos diâmetros). Estes testes são apresentados a seguir, onde verifica-se inicialmente a aplicabilidade do método proposto com imagens sintéticas, com todos os dados

conhecidos para poder validar os resultados e identificar os problemas existentes nas imagens reais. Desta forma construiu-se imagens com grãos juntos e de formas distintas, sobrepostos parcialmente e totalmente (em diversos níveis). Todas as imagens sintéticas possuem resolução de 300 x 250 pixels e 256 tons de cinza. Até o exemplo 5 não é feita a etapa de reconstrução do grão, pois os grãos tem exatamente as formas dos elementos estruturantes usados.

No primeiro exemplo (figura 9) são utilizados grãos quadrados, dispostos juntos e com pequenas partes sobrepostas por outros grãos. A descrição completa dos grãos do exemplo 1 está mostrada na figura 10. Na figura 11 são vistos os resultados obtidos pelo programa tendo como entrada a imagem do exemplo 1, utilizando elementos estruturantes quadrados. Como pode-se observar estes resultados são 100% corretos.

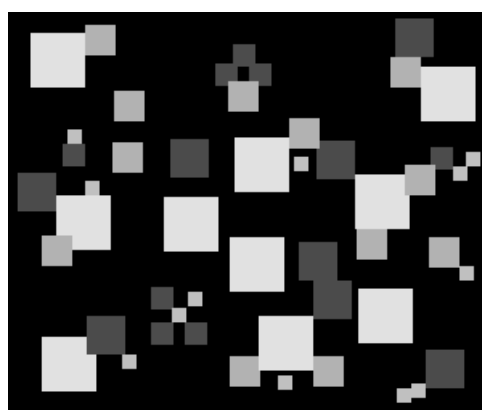


Figura 9: Exemplo 1 - grãos quadrados com pequenas partes sobrepostas

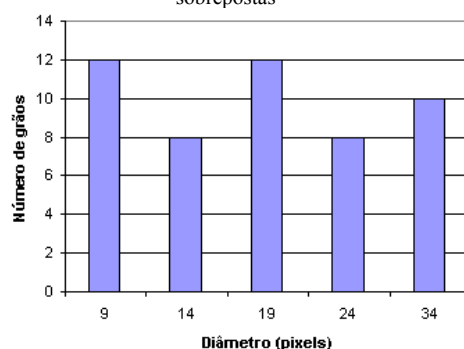


Figura 10: Curva granulométrica do exemplo 1

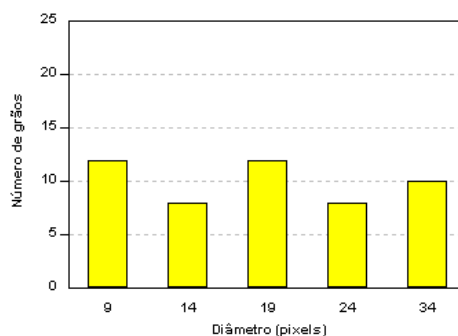


Figura 11 Curva granulométrica do exemplo 1 obtida pelo programa

No exemplo 2, tem-se um teste semelhante, mas com

grãos em formato de losango (figura 12). A descrição completa dos grãos está na figura 13 e os resultados calculados pelo programa utilizando elementos estruturantes em forma de losango, podem ser vistos na figura 14. Como podemos observar através da análise dos gráficos das figuras 13 e 14, o método demonstrou-se eficiente, calculando de maneira correta o número de grãos de formas losangulares com poucos contados e sobreposições.

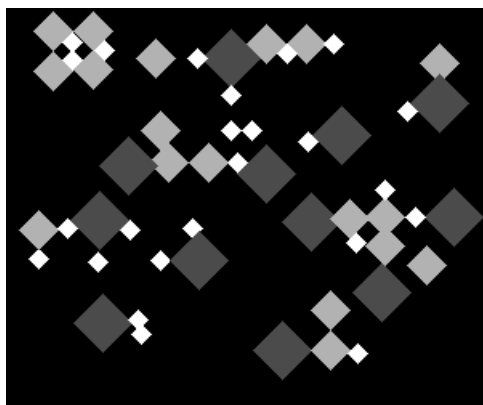


Figura 12: Exemplo 2: grãos losangulares com pequenas partes sobrepostas

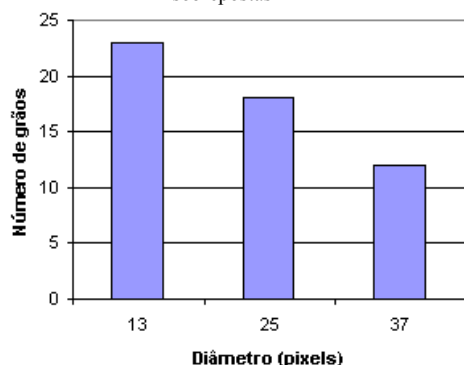


Figura 13: Curva granulométrica do exemplo 2

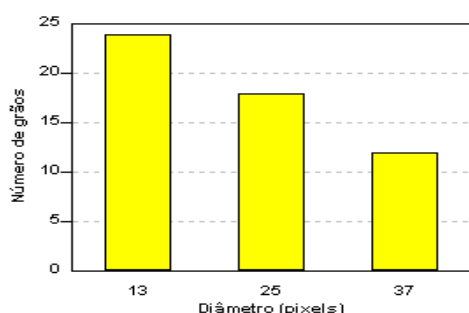


Figura 14: Curva granulométrica do exemplo 2 obtida no programa

No exemplo 3, tem-se novamente formas quadradas (figura 15), mas agora possuindo grãos totalmente sobrepostos ou com mais de 50% de sua área sobreposta. Comparando os dados da imagem (figura 16) com os resultados obtidos pelo programa usando elementos estruturantes quadrados (figura 17) podemos observar que, o método falhou em grãos menores e teve um acerto maior nos grãos maiores. Isto deve-se

ao fato de alguns grãos menores presentes na imagem estão dispostos atrás ou sobre os grãos maiores, fazendo assim com que estes grãos não tenham sido identificados pelo algoritmo. Em um método manual (ou feito através de peneiras) existe a possibilidade de se mover as peneiras até que grãos que estão em algum momento sobrepostos se movam de forma a cair nos buracos das peneiras equivalentes ao seu tamanho, sendo, identificados de forma precisa. Este erro no método proposto era esperado, uma vez que não existe esta flexibilidade na análise por imagens. Uma proposta para resolver este problema é a de se capturar não só uma, mas várias imagens correspondentes à mesma amostra de grãos, com estes em posições diferentes e tirar uma média dos resultados destas imagens, usando uma granulometria por medida e normalizada.

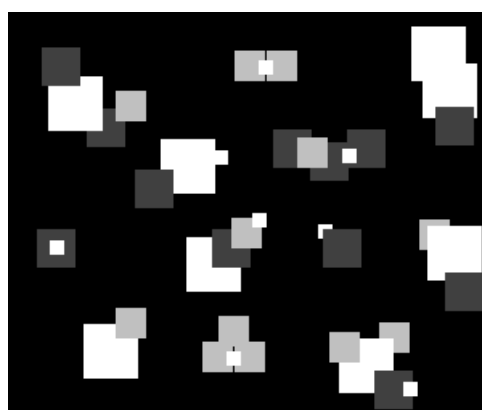


Figura 15: Exemplo 3: de grãos quadrados com grandes partes ou totalmente sobrepostos

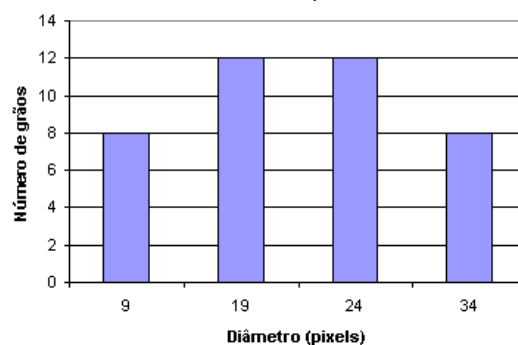


Figura 16: Curva granulométrica do exemplo 3.

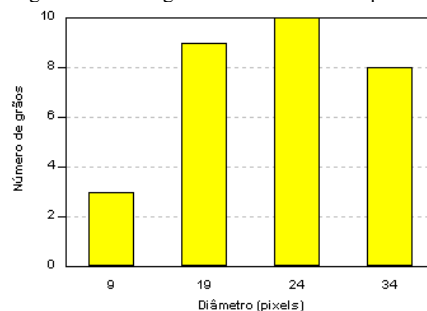


Figura 17: Curva granulométrica do exemplo 3 obtida a pelo programa

No exemplo 4, faz-se um teste semelhante ao anterior, mas com grãos em formato de losango (figura

18). Comparando os gráficos das figuras 19 e 20 tem-se uma análise equivalente ao exemplo anterior que possuía as mesmas complicações para as imagens com grãos quadrados. Da mesma forma, tem-se as mesmas limitações e erros nos menores grãos.

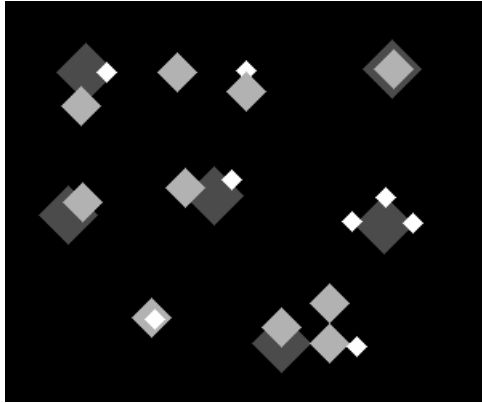


Figura 18: Exemplo 4: grãos losangulares com grandes partes sobrepostas ou totalmente sobrepostos

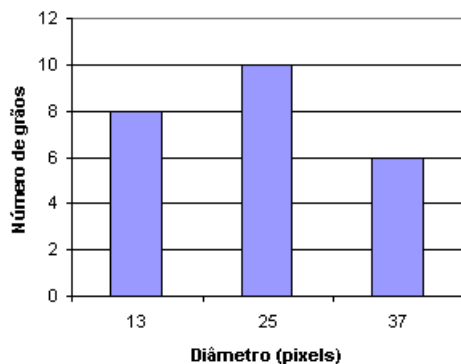


Figura 19: Curva granulométrica do exemplo 4

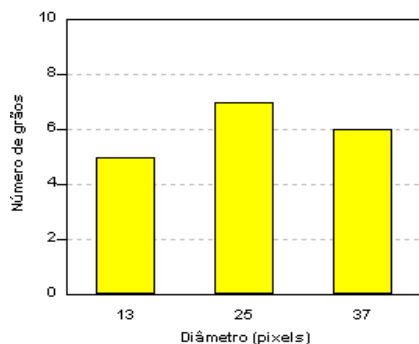


Figura 20: Curva granulométrica do exemplo 5 obtida do programa.

A próxima complexidade inserida nos testes foi adicionar a uma mesma análise grãos de vários formatos não perfeitamente iguais os elementos estruturantes usados na análise (quadrados), para aproximar as imagens de casos reais mais complicados que englobem grãos de formatos diferentes. No exemplo 5 é usada a imagem da figura 21. Nesta imagem observamos quadrados com as bordas arredondadas de dois tamanhos distintos, retângulos dispostos tanto em pé como deitados e trapézios. Os quadrados menores possuem 30 pixels de diâmetro

enquanto os maiores possuem diâmetro 44, os retângulos e os trapézios possuem diâmetro 40, ambos possuem 30 pixels na menor distância entre os seus dois lados.

Nas figuras 22, 23 e 24 tem-se os resultados manuais e da granulometria usando o programa sem e com reconstrução dos grãos. Podemos observar na figura 23 que alguns grãos menores inexistentes são identificados, o que também acontecia no caso dos algoritmos em branco e preto antes da inclusão da reconstrução [Conci et al., 2004]. Esses falso grãos menores são na realidade partes do contorno dos grãos onde as famílias de elementos estruturantes não se encaixam. Podemos observar que ao incluir o processo de reconstrução (figura 24) esses falsos grãos desaparecem.

Observamos ainda nos gráficos dessas figuras que todos os grãos foram identificados como tendo um tamanho menor do que o tamanho real. Isto acontece porque, como o elemento estruturante usado (no caso o quadrado), não representa perfeitamente a forma dos grãos da imagem, o menor elemento estruturante a não caber no grão fará com que todo o grão seja perdido durante a execução do método. Os grãos de diâmetro 44 foram identificados como tendo diâmetro 38. Isto se deve ao fato do algoritmo reconhecer, para este caso (elemento estruturante quadrado), o maior quadrado que se encaixa dentro da área do grão. Esta característica fez também com que os grãos retangulares e com formatos de trapézios (de diâmetro 40) tenham sido identificados como tendo diâmetro 30 que, como havia sido mencionado, é a menor distância entre seus dois lados. Para obter-se a diagonal real, isso é a que é definida como maior distância entre dois pontos quaisquer de um objeto, deve-se usar a granulometria por fechamento ou anti-granulometria.

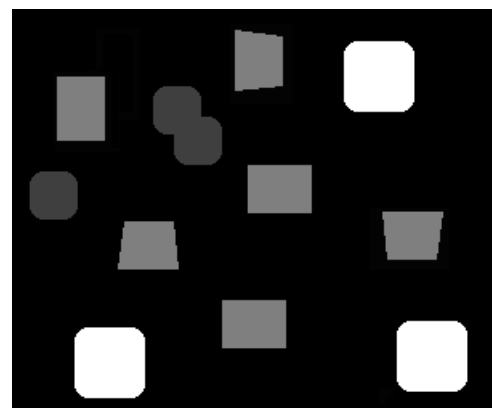


Figura 21: Exemplo de grãos com formatos distintos porém parecidos com um quadrado

No último exemplo usa-se uma imagem real: a obtida a partir da figura 1(a) por eliminação dos grãos conectados à borda da imagem (figura 25). Neste pré-processamento observa-se que, como os grãos da imagem se tocam no processo de eliminação de grãos conectados à borda são eliminados alguns grãos a ela conectados através de outros grãos e não diretamente.

Assim uma melhoria neste processo deve ser introduzida como um tratamento prévio da imagem para eliminar alguns desses contatos. Na figura 26 são encontrados 139 grãos, pois neste casos os núcleos interiores em diferentes tons são contatos como outros grãos.

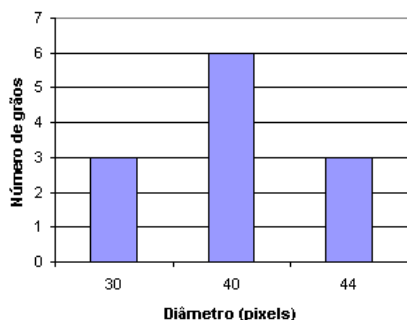


Figura 22: Curva granulométrica do exemplo 5

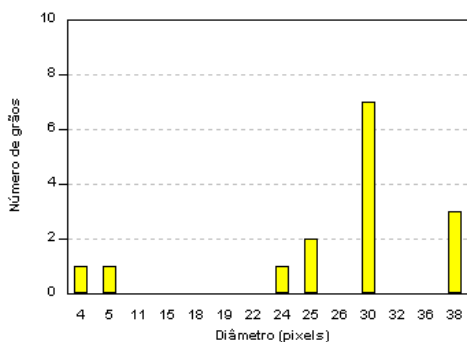


Figura 23: Curva granulométrica do exemplo 5 obtida sem reconstrução

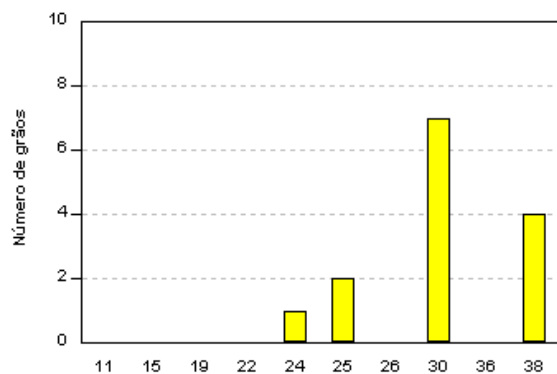


Figura 24: Curva granulométrica do exemplo 5 obtida com reconstrução

Conclusão

A partir dos testes realizados observou-se que, para imagens onde a forma dos grãos pode ser descrita de maneira homogênea por um elemento estruturante crescente, o método proposto tem uma resposta excelente, mesmo quando alguns grãos se tocam e se sobrepõem parcialmente. Para o caso de grãos se sobrepõem totalmente ou em grande parte de sua área, o método começa a apresentar alguns problemas. Em

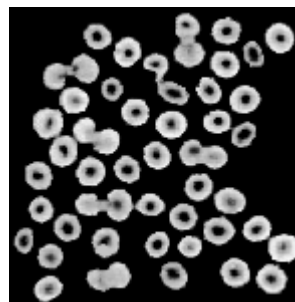


Figura 25: Exemplo 6 imagem obtida a partir da figura 1(a) por eliminação dos grãos conectados à borda da imagem.

imagens onde existem grãos de diversos formatos distintos, devemos escolher o formato que melhor se assemelha a todos os grãos presentes na imagem, para assim ter o mínimo de perda de informações possível. Um problema observado no método adotado é o tempo de processamento, pois este é dependente tanto das dimensões da imagem quanto do tamanho do maior grão presente, como a imagem é um conjunto desconhecido, esta dependência pode complicar a utilização deste método. Apesar destas considerações, os resultados obtidos com as imagens testadas em relação aos seus valores reais correspondentes foram muito interessantes.

Na forma da granulometria utilizada (por abertura) os diâmetros dos grãos encontrados sempre estão relacionados às suas menores dimensões interiores. Isso porque a abertura se caracteriza por eliminar os grãos onde o elemento estruturante utilizado não mais se encaixa. Se fosse desejado caracterizar como diâmetro por exemplo a maior dimensão do grão uma eliminação baseado no fechamento (antigranulometria) deve se mostrar mais adequada.

Finalmente, como esse método permite adaptações a praticamente qualquer aspecto, entender a aplicabilidade das técnicas implementadas é fundamental. Um sistema voltado a identificar como diferente, áreas em diferentes tons, não pode se mostrar adequado quando o que se quer é contar grãos com interior complexo caracterizado por áreas em tons distintos como os da figura 25. Neste caso a escolha de um elemento estruturante que tenha mesma variação de tons interiores que o grão resolveria o problema. Ou seja é fundamental entender as características da metodologia para que um sistema que a use tenha suas potencialidades corretamente utilizadas, já que a morfologia matemática pode facilmente incluir muitas possibilidades e ser adaptada a praticamente qualquer circunstâncias.

Referências

- [1] G. Matheron, Random Set and Integral Geometry, New York, J. Wiley, 1975.
- [2] G. Matheron, Elements pour une théorie des milieux poreux, Masson, Paris, 1967.

- [2] J. Serra, Image Analysis and Mathematical Morphology. Orlando, Academic Press, 1982, vol 1.
- [3] E. A. Vieira, R. H. C. Melo "Granulometria: Uma Aplicação para Contagem e Medição de Grãos em Imagens Digitais" Monografia Dep. de Ciência da Computação - da Universidade Federal Fluminense para obtenção do grau de Bacharel, 2004.
- [4] D. Pizzolato, CxImage. 2003. disponível em: <http://www.codeproject.com/bitmap/cximage.asp?target=CxImage>. Acesso em 30 out. 2003.
- [5] C. Maunder, MFC Grid control 2.24. 2002, <http://www.codeproject.com/miscctrl/gridctrl.asp?target=GridCtrl>. Acesso em 5 jan. 2002.
- [6] Yuantu Huang, Simple to Use, Yet Powerful Graphics Classes. 2000. Disponível em: <http://codeguru.earthweb.com/controls/GraphicsClasses.shtml>. Acesso em 15 jan. 2002.
- [7] SDC Information Systems: Create a disk or a semi-sphere structuring element. 1998. Disp. em: <http://www.mmorph.com/pymorphpro/morph/morph/mmsedisk.html>. Acesso em 10 nov. 2003.
- [8] P. Soille, Morphological Image Analysis: Principles and Applications, Springer, Berlin, 1999.
- [9] A. Conci, I. N. Ferraz, A. C. B. Garcia, E. A. Vieira e R. H. C. Melo, "Avaliação da Geometria dos Meios Porosos por Imagens Binárias", submetido ao DINCON 2004.
- [10] T. Schouten, Course RT2 Image Processing Chapter 11: Mathematical Morphology mmtutor v.1.0, 30 de abril de 2001: <http://www.mmorph.com/mmtutor1.0/html>.
- [11] E.P. Calixto, Morfologia Matemática: Propriedades da Dilatação e Erosão - dez 2003. <http://www.ic.uff.br/~aconci/PropriedadesDilEro.pdf>

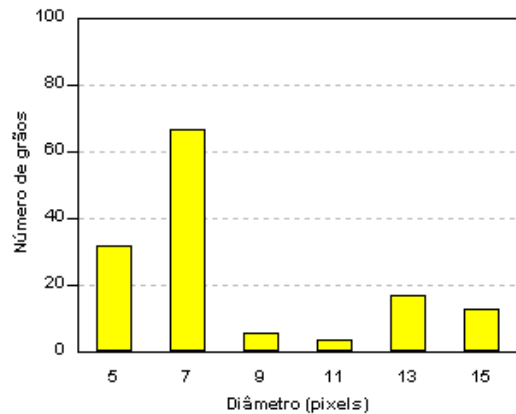


Figura 26: Curva granulométrica do exemplo 6 com reconstrução