



Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica  
Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica

Método de medição sem contato e  
reconstrução 3D a partir do foco  
utilizando processamento e análise de  
imagens

por

Jonathas Jerônimo Barbosa

sob orientação do

Prof. Dr. Leonardo Vidal Batista

João Pessoa - PB

Junho /2012

**Jonathas Jerônimo Barbosa**

# **Método de medição sem contato e reconstrução 3D a partir do foco utilizando processamento e análise de imagens**

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

**Orientador: Prof. Dr. Leonardo Vidal Batista**

**João Pessoa - PB**

**Junho /2012**

# Resumo

A utilização massiva de moinhos e hidrociclones operando em circuito fechado, em diversas aplicações industriais de grande relevância sócioeconômica, confere especial importância ao problema do desenvolvimento de processos e modelos matemáticos voltados à otimização do circuito de cominuição-classificação. Este trabalho apresenta uma investigação sobre técnicas para redução do erro de predição (aproximação por esferas) em medições sem contato visando aumentar a exatidão na granulometria de minérios com o intuito de aumentar a eficiência de classificação por hidrocicloneamento. Métodos computacionais para contagem e mensuração de partículas foram desenvolvidos e implementados, com vistas a comparar a visão computacional ao método de separação de partículas por peneiramento. O método proposto trata, também, da reconstrução 3D das partículas baseado na medida de suas alturas. Para tanto, uma pilha de imagens com foco variável é capturada. A partir desta pilha calcula-se a altura média das partículas (estimativa do eixo Z), exibem-se as imagens da pilha completamente em foco e a imagem de índices de alturas. De posse da estimativa da altura média das partículas é feita a aproximação da forma das partículas (esferóides) e a comparação com os resultados da aproximação por esferas. Instrumentos de medição foram adaptados para aquisição das imagens e também para estimar a altura das partículas das amostras.

Palavras chave - *shape from focus*, reconstrução 3D, medição sem contato.

# Abstract

The massive use of mills and hydrocyclones operating in closed circuit, in several great relevance socio-economic industrial applications, checks special importance to the problem of the development of processes and mathematical models returned to the optimization of the circuit. This work presents an investigation about about techniques for reducing the prediction error (approximation by spheres) to increase accuracy in non-contact measurements of particle size of minerals in order to increase the efficiency of classification by hydrocyclones. Computational methods for counting and measuring particles were developed and implemented, in order to compare the computational vision and particle size separation sieving methods. The proposed method also deals with 3D reconstruction of the particles based on the measurement of their heights. To this goal, a stack of images with variable focus is captured. From this stack calculate the average particle size (estimated from the z axis), display the pictures of the stack through the focus index and the image height. An estimate of the average height of the particles is done and than approximate the shape of the particles (spheroids) and comparison with the results approximating a sphere. Measuring instruments have been adapted for the acquisition of images and also for estimating the height of the particles of the samples.

Keywords - Shape from focus, 3D reconstruction, no-contact measurement.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>7</b>
2.1	Forma a partir do foco . . . . .	7
2.2	Profundidade de campo . . . . .	9
2.3	Processamento e análise de imagens . . . . .	9
2.3.1	Filtros no domínio espacial . . . . .	10
2.3.2	Operação de convolução . . . . .	11
2.3.3	Convolução em processamento digital de imagens . . . . .	12
2.3.4	Filtros de suavização (Passa-baixas) . . . . .	12
2.3.5	Filtros de realce (Passa-altas) . . . . .	14
2.3.6	Filtros de detecção de bordas . . . . .	14
2.3.7	Filtros no domínio da frequência . . . . .	17
2.3.8	Transformada de fourier e domínio da frequência . . . . .	18
2.4	Visualização 3D . . . . .	21
2.5	Morfologia Matemática . . . . .	21
2.5.1	Conjuntos . . . . .	22
2.5.2	Operações Morfológicas . . . . .	23
2.5.3	Abertura e Fechamento - Imagens Binárias . . . . .	26
2.5.4	Morfologia em Escala de Cinza . . . . .	28

<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>33</b>
3.1	O Método Proposto . . . . .	33
3.1.1	Amostra . . . . .	33
3.1.2	Aquisição de imagens . . . . .	35
3.1.3	Processamento das imagens 1 . . . . .	38
3.1.4	Processamento das imagens 2 . . . . .	41
3.2	Ambientes de programação . . . . .	42
3.3	Calibração do instrumento de medição . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>Discussão e Conclusões</b>	<b>63</b>
	<b>Referências</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Apêndice</b>	<b>73</b>
6.1	Apêndice A . . . . .	73
6.2	Apêndice B . . . . .	75

# Lista de Figuras

2.1	Sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco . . . . .	8
2.2	Profundidade de Campo. Fonte: <a href="http://www.cambridgeincolour.com">http://www.cambridgeincolour.com</a> . . . . .	9
2.3	Mecanismo da operação de convolução no domínio espacial . . . . .	13
2.4	Dilatação e Erosão morfológicas . . . . .	26
2.5	Efeito da abertura por elemento estruturante de raio 15 . . . . .	27
3.1	Diagrama em blocos do processo de medição sem contato . . . . .	34
3.2	Câmera . . . . .	37
3.3	Microscópio . . . . .	37
3.4	Associação Câmera com Microscópio . . . . .	37
3.5	Microscópio . . . . .	37
3.6	Microscópio x Instrumento de Medida . . . . .	37
3.7	Simulação do peneiramento computacional . . . . .	38
3.8	Interseção de grãos com a fronteira da imagem . . . . .	39
3.9	Histograma de contagem de grãos . . . . .	40
3.10	Sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco . . . . .	41
3.11	Micrômetro ocular . . . . .	43
3.12	Retícula - Aumentos 1x, 1,5x, 2x, 3x, 4x . . . . .	44
3.13	Micrômetro . . . . .	45
4.1	Distribuição granulométrica vermiculita . . . . .	47
4.2	Amostras vermiculita: (a) Peneira 16 (b) Peneira 30 (c) Peneira 40 . . . . .	48
4.3	Peneiramento computacional - Peneira 16 . . . . .	48
4.4	Distribuição em tamanho . . . . .	49

4.5	Histograma de contagem de grãos . . . . .	49
4.6	Peneiramento computacional - Peneira 30 . . . . .	50
4.7	Distribuição em tamanho . . . . .	51
4.8	Histograma de contagem de grãos . . . . .	51
4.9	Peneiramento computacional - Peneira 40 . . . . .	52
4.10	Distribuição em tamanho . . . . .	53
4.11	Histograma de contagem de grãos . . . . .	53
4.12	Pilha de imagens; $i = 0$ até $i = 9$ . . . . .	55
4.13	Registro de imagens . . . . .	56
4.14	Imagem Completamente em Foco . . . . .	57
4.15	Índices de alturas . . . . .	57
4.16	Pilha de imagens; $i = 0$ até $i = 10$ . . . . .	58
4.17	Registro de imagens . . . . .	59
4.18	Imagem Completamente em Foco . . . . .	60
4.19	Índices de alturas . . . . .	60
5.1	Discrepâncias no produto da peneira de abertura $0,600mm$ - Aumento 2x	65
5.2	Discrepâncias no produto da peneira de abertura $0,600mm$ - Aumento 4x	66
5.3	Índices de alturas . . . . .	66
5.4	Índices de alturas . . . . .	66
6.1	Microscópio eletrônico de varredura . . . . .	74

# Lista de Tabelas

3.1	Distribuição granulométrica da amostra de minério - vermiculita . . . . .	35
3.2	Quantidade de pixels por milímetro em cada aumento . . . . .	44
3.3	Alturas das esferas . . . . .	45
4.1	Distribuição Granulométrica da Vermiculita - Peneiramento . . . . .	47
4.2	Altura média . . . . .	61
4.3	Medidas peneiras 16, 30 e 40 . . . . .	61
4.4	Relação entre peneiras . . . . .	61
6.1	Validação do Instrumento de medição . . . . .	73

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A utilização massiva de moinhos e hidrociclones operando em circuito fechado, em diversas aplicações industriais de grande relevância socioeconômica, confere especial importância ao problema do desenvolvimento de processos e modelos matemáticos voltados à otimização do circuito [Lira, 1985], [Komuench, 2000]

Os hidrociclones são dispositivos de classificação que dividem as partículas do fluxo de entrada, imersas em líquido, em duas correntes: uma superior, que leva ao *overflow* do classificador, e transporta as partículas mais leves; e uma inferior, que leva à descarga, ou *underflow*, do classificador, e transporta as partículas mais pesadas. Dezenas de variáveis determinam a eficiência de classificação, incluindo fatores relacionados à geometria do hidrociclone, às condições operacionais e aos atributos do material a ser classificado.

Com uma moagem eficiente o trabalho do hidrociclone torna-se mais eficaz, mas para obter-se a eficiência na cominuição faz-se necessário a utilização de um bom modelo matemático. Pode-se ressaltar, pelo menos, duas razões para a busca de tal modelo de otimização do processo: 1°. aumento da produtividade e redução de desperdícios e 2°. como o processo de moagem é o que contribui com a maior fração de custos operacionais de instalação e custos de energia, a supermoagem ou moagem insuficiente têm drásticos efeitos sobre o meio-ambiente. Outrossim, as perdas de materiais úteis por uma má cominuição corroboram para os desperdícios.

Em geral, a configuração do circuito moinho-hidrociclone é feita da seguinte

forma:

1. A descarga do moinho corresponde à alimentação do hidrociclone
2. A descarga do hidrociclone, composta majoritariamente por partículas de diâmetro superior a um certo limiar, retorna à alimentação do moinho, para um novo ciclo de moagem, juntamente com a nova alimentação.
3. O *overflow* do hidrociclone, composto majoritariamente por partículas de diâmetro inferior a um certo limiar, é o produto final do circuito.

O hidrociclone classifica partículas do material pelo tamanho, de forma a garantir que o produto final esteja na granulometria requerida. Observa-se de imediato duas possíveis fontes de ineficiência associadas à operação do circuito:

1. Ineficiência do moinho, que pode descarregar uma quantidade excessiva de partículas com diâmetro acima da especificação requerida. Isto acarretará uma carga circulante acima da desejada. O hidrociclone realimentará o moinho com estas partículas de granulometria elevada, levando a múltiplos ciclos de moagem do material [Lira, 1990]
2. Ineficiência do hidrociclone, que pode reenviar ao moinho uma quantidade excessiva de partículas cujos diâmetros já atenderiam à especificação e que, portanto, poderiam sair do sistema, mas que retornam indevidamente a novos ciclos de moagem [Komuench, 2000]

Em geral, circuitos industriais apresentam, em maior ou menor escala, os dois tipos de ineficiência acima descritos.

O modelo clássico de Lynch-Rao [Lynch e Rao, 1975] pode ser aplicado a uma ampla variedade de hidrociclones industriais. A implementação computacional do modelo de Lynch-Rao permite a otimização de hidrociclones através da determinação de fatores geométricos, capacidade, pressão e da percentagem de sólidos na alimentação.

Um problema prático de otimização a partir do modelo de Lynch-Rao exige a obtenção experimental da distribuição granulométrica [Silva et al., 2004] na descarga e no *overflow* do hidrociclone. A distribuição granulométrica empírica depende das características operacionais do hidrociclone, bem como da natureza e das condições

momentâneas do material que se deseja classificar. Após a obtenção da distribuição granulométrica, é possível calcular todas as constantes necessárias à caracterização do sistema de classificação, de acordo com o modelo de Lynch-Rao. De posse das constantes, pode-se efetuar simulações computacionais do hidrociclone sob novas condições operacionais, o que viabiliza uma otimização rápida e de baixo custo.

Existem várias técnicas de análise granulométrica. A escolha da técnica adequada depende essencialmente do tamanho das partículas a serem analisadas. A granulometria de partículas acima de aproximadamente 38 micrômetros pode ser efetuada por peneiramento. Dentre as muitas desvantagens associadas ao uso de peneiras para determinação do perfil granulométrico, pode-se citar [Allen, 1997]: impossibilidade da análise de partículas abaixo de 38 micrômetros; baixa resolução do eixo de tamanhos de grãos; quanto maior o tempo de peneiramento, menor a granulometria resultante, porque as partículas tendem a se orientar pela menor dimensão e atravessar a peneira (em consequência, o tempo de peneiramento e a intensidade de vibração devem ser rigidamente controlados); uma vez que o método tende a mensurar a menor dimensão da partícula, resultados muito imprecisos podem ocorrer com matérias de partículas alongadas, como o paracetamol na indústria farmacêutica.

A sedimentação gravídica, baseada na Lei de Stokes é aplicável na faixa de 2-50 micrômetros, é um método tradicional especialmente utilizado na indústria de tintas e cerâmicas [Lambourne e Strivens, 1999]. Os equipamentos podem ser muito simples e puramente manuais, ou baseados em centrífugas e raios X ou raios Gama. Algumas das desvantagens das técnicas baseadas em sedimentação gravídica são: não é aplicável a emulsões onde as partículas mais finas não se sedimentam, ou onde as partículas mais pesadas se sedimentam muito rapidamente; a equação de Stokes considera que as partículas são esféricas, o que pode induzir erros grosseiros em algumas situações práticas, tais como na determinação granulométrica de caulim, cujas partículas tendem a ser discóides; a viscosidade da emulsão e, portanto, sua temperatura deve ser rigorosamente controlada - uma mudança de 1°C produz uma alteração de 2% na viscosidade; para partículas muito finas, o movimento Browniano entra em ação - os erros na aferição dos tamanhos podem ultrapassar 100% para partículas de 0,5 micrômetros; para partículas acima de 50 micrômetros, a sedimentação é turbulenta, e os resultados são imprecisos; não é aplicável para misturas de diferentes densidades; uso de raios X

em alguns equipamentos, com riscos à saúde dos operadores.

A granulometria por difração a laser é empregada em muitos setores industriais. A faixa aplicável vai de 0,02 micrometros a 3000 micrometros. As técnicas se baseiam no fato de que o ângulo de difração do laser é proporcional ao tamanho das partículas, e os equipamentos mais modernos implementam o espalhamento de Mie para a interação entre luz e matéria sendo útil para a faixa de tamanho entre 0,05 e 100 micrometros. As desvantagens da técnica incluem o alto custo dos equipamentos e a necessidade de conhecer ou determinar os índices refrativos e a parcela de absorção do material e do meio material.

As técnicas baseadas em aparelhos tecnologicamente sofisticados apresentam altos custos associados à compra e manutenção dos aparelhos, bem como, em muitos casos, problemas associados ao uso de radiação ionizante (raios gama e raios X). Os sistemas mais baratos, por outro lado, exigem muitas vezes a utilização de estufas de secagem, o que implica em maior tempo para obtenção de resultados e se caracterizam por baixa precisão na determinação do perfil granulométrico. Em praticamente todos os casos, o tempo de análise depende da faixa granulométrica que vai ser analisada e da precisão requerida, ou seja, quanto maior a precisão, maior o tempo gasto para a análise, que pode atingir até 24h.

Nenhuma das técnicas anteriormente descritas é capaz de classificar as partículas de acordo com suas formas. A análise morfológica, no entanto, tem sido cada vez mais considerada essencial na determinação das características do material, em diversas aplicações [Crompton, 2005]. Algumas técnicas utilizadas para avaliação morfológica são o espaço de escalas de curvaturas (Curvature Scale Space, CSS) e medidas de redondeza e rugosidade [Pirard, Hoyez, 1995]. [Pirard, 1994] mostrou que um parâmetro derivado de uma sucessão de operações de abertura morfológica com raios crescentes tem uma correlação perfeita com o gráfico visual de [Krumbein, 1941], utilizado em sedimentologia [Francus, 2005].

Em certas situações, quando se obtém imagens a partir de uma câmera fotográfica com uma distância muito pequena entre a objetiva da câmera e o objeto de interesse, ou por microscopia ótica, por exemplo, apenas uma pequena parte da imagem fica em foco. As estruturas do objeto mais próximas ou mais distantes do ponto perfeito de foco podem ficar completamente fora de foco. Este resultado é o efeito de uma profundidade

de campo muito reduzida. A profundidade de campo é a gama de distâncias em torno do plano focal na qual há nitidez aceitável.

Há ocasiões em que parte da imagem é intencionalmente deixada fora de foco, pois este efeito faz com que a parte em foco torne-se mais realçada em todo o contexto da imagem. Por outro lado, existem casos em que a estreita profundidade de campo torna-se um problema. Como exemplo, tem-se o problema específico de granulometria por visão computacional, em que, para resultados otimizados, necessita-se de imagens com foco máximo em toda sua extensão.

A reconstrução tridimensional de objetos é de grande interesse em diversas áreas, pois refletem a percepção que o ser humano tem da realidade ao seu redor. Como exemplo de aplicação de reconstrução 3D, e seguindo a linha do exemplo de granulometria citado anteriormente, tem-se a reconstrução de grãos e partículas para análise morfológica de tais objetos.

A análise qualitativa manual através de microscopia é também muito utilizada. Contudo, a carga de trabalho sobre o operador é árdua, o que torna o resultado propenso a erros causados por fatores relacionados à fadiga e à formação do operador e à subjetividade intrínseca à análise visual por seres humanos. A inspeção visual por seres humanos é especialmente limitada na análise granulométrica, que exige a contagem de dezenas de milhares de partículas para que se obtenha um perfil estatisticamente significativo do material.

A análise computacional de imagens, ou visão computacional, permite a caracterização precisa da granulometria e morfologia das partículas [Wojnar, 1999]. As técnicas baseadas em visão computacional permitem ainda a investigação de fenômenos relevantes tais como tendência a aglomeração e detecção de partículas de impurezas, e estão sendo cada vez mais adotadas em muitos setores, tais como nas indústrias farmacêuticas, de biotecnologia, de abrasivos, cerâmicas, polímeros, explosivos e pigmentos. Há sistemas comerciais de análise granulométrica baseados em análise computacional de imagens, bem como sistemas comerciais para otimização, baseados em modelos matemáticos variados, mas segredos industriais impedem que as técnicas empregadas sejam reveladas em detalhes. Um estudo recente revela uma boa correlação entre granulometria a laser e análise de imagens auxiliada por computador, em um problema de granulometria fina de minérios [Dur et al., 2004]. O método de análise empregado no

trabalho citado não é automático - o software é apenas um auxiliar do operador.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar uma técnica para reduzir os erros de predição (aproximação por esferas) em medições sem contato. Para este fim serão desenvolvidos e adaptados instrumentos de medição para análise de imagens. O foco das imagens foi a ferramenta utilizada para estimar parâmetros como forma e dimensões das partículas estudadas. Pretende-se mostrar que esta abordagem produz resultados mais exatos do que as aproximações de partículas por esferas.

Objetivos específicos:

- aumento da exatidão na granulometria de minérios;
- adaptação de instrumento de medição;
- analisar técnicas de pré-processamento para criação de imagens de alto intervalo dinâmico (hdr);
- análise de detecção de foco em pilha de imagens.

## Fundamentação Teórica

Este capítulo descreve os principais conceitos utilizados no método de reconstrução 3D.

Segundo [Ferreira, 2007] o principal objetivo do sistema de medição sem contato é a aquisição das coordenadas de pontos localizados na superfície da qual se pretende medir. A questão principal das técnicas de aquisição de informação 3D sem contato é a determinação das coordenadas tridimensionais de pontos ou de uma imagem ou de um objeto para obtenção de suas medidas.

O que nota-se ao longo dos últimos anos é que os estudos nesta área são crescentes no sentido de aprimorar técnicas e tornar as medidas adquiridas cada vez mais exatas e precisas, fato este que é impulsionado pelo número cada vez maior de aplicações para este tipo de medição.

Não é objetivo deste trabalho abordar todas as técnicas de medição sem contato, portanto serão apresentadas apenas algumas das principais técnicas. Dentre outras tem-se Fotogrametria, Interferometria, medição por Moiré, medição por laser. A forma de medição que será investigada é a FPF (forma a partir do foco).

### 2.1 Forma a partir do foco

Forma a partir do foco - FPF é uma tradução livre do inglês *Shape From Focus* - SFF que é um dos métodos utilizados para reconstruir estruturas 3D de objetos a partir de uma sequência de imagens 2D.

Na literatura existem outros métodos de reconstrução de estruturas tridimensi-

onais baseada em forma que são indicadas por *shape from X*, onde o “X” significa a ferramenta utilizada na reconstrução, por exemplo:

- *shape from defocus*
- *shape from shading*
- *shape from stereo*
- *shape from texture*
- *shape from motion*
- *shape from silhouettes*

No método da SFF, que será utilizado neste trabalho, capturam-se uma sequência de imagens, mostrada na Figura 3.10, que são obtidas pela variação gradual do foco ao longo do objeto desde sua base até o seu topo, em outras palavras, SFF é um método que visa medir a profundidade de campo de uma imagem utilizando uma sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco.

Neste trabalho, os diferentes ajustes de foco são medidos a partir de instrumentos instalados no microscópio ótico a saber: uma agulha e um transferidor. A cada mudança no foco da imagem, a leitura da agulha era feita, registrada e assim a imagem era capturada. Os detalhes da montagem do instrumento de medida de variação do foco encontram-se na Seção 3.1.2

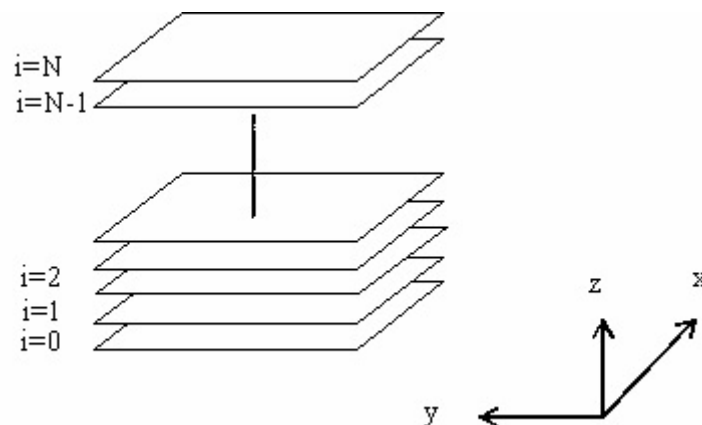


Figura 2.1: Sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco

## 2.2 Profundidade de campo

A profundidade de campo se refere a uma gama de distâncias em torno do plano focal na qual há nitidez aceitável. Alguns fatores como tipos de câmeras utilizadas, lentes, aberturas e distância focal influenciam na profundidade de campo de uma imagem, assim como é influenciada pelo tamanho da impressão e pela distância de visualização da imagem.

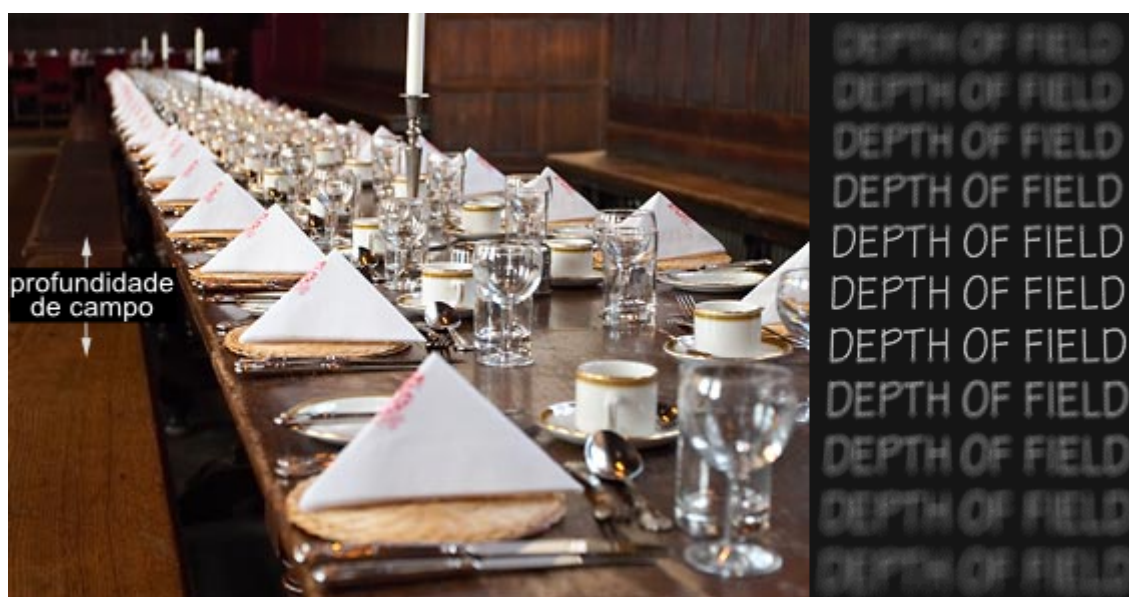


Figura 2.2: Profundidade de Campo. Fonte: <http://www.cambridgeincolour.com>

A profundidade de campo não muda em nenhuma região da imagem de modo abrupto, ou seja, em nenhum ponto observa-se transição de nitidez total para desfoque, sempre ocorre uma transição gradual. Na verdade, tudo imediatamente em frente ou atrás do plano de foco já começa a perder nitidez - mesmo que não percebamos com nossos olhos ou pela resolução da câmera.

## 2.3 Processamento e análise de imagens

Seja uma função  $f(x, y)$  bidimensional com  $(x, y)$  coordenadas do plano cartesiano e  $f$ , imagem de  $(x, y)$ , chamada de intensidade. Os valores  $x, y, f$  definem uma imagem. Quando estes valores são todos finitos e discretos pode-se dizer que definem uma *imagem digital*. Segundo [Gonzales e Woods, 2000] os métodos de processamento de imagens digitais possuem duas principais áreas de aplicações: melhoria da informa-

ção pictórica para interpretação humana; e, na percepção de máquina, processamento de armazenamento, transmissão e representação de dados.

### 2.3.1 Filtros no domínio espacial

Realçar, processar, filtrar uma imagem tem por objetivo obter resultados melhores do que os alcançados na aquisição da imagem original visando objetivos específicos. Entende-se por *objetivos específicos* o uso da técnica de realce adequada para o problema em questão.

As técnicas de realce de imagens são divididas em dois domínios: métodos no domínio espacial e métodos no domínio da frequência.

Os métodos de realce no domínio espacial serão discutidos nesta Seção 2.3.1 e os métodos de realce no domínio de frequência serão discutidos na Seção 2.3.7.

Em Processamento de Imagens Digitais, algumas operações são feitas trabalhando com os valores dos *pixels* da vizinhança de um determinado *pixel* e os correspondentes valores de uma subimagem que tem as mesmas dimensões desta vizinhança. Tal subimagem é geralmente chamada de filtro, ou máscara. Os valores em um filtro são chamados de coeficientes, em vez de *pixels*.

O conceito de filtro tem suas origens no uso da transformada de Fourier para processamento de sinais no então chamado domínio da frequência [Gonzales e Woods, 2000]. Entretanto, os filtros usados no domínio espacial - termo usado para diferenciar este tipo de processo da mais tradicional filtragem no domínio da frequência - operam diretamente nos *pixels* de uma imagem e a notação usada para estas operações é dada pela Equação (2.1)

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.1)$$

onde  $f(x, y)$  representa a imagem de entrada e  $g(x, y)$  é a imagem processada pelo filtro ou máscara  $T$ .

O processo consiste simplesmente em mover o filtro de ponto a ponto em uma imagem. Em cada ponto, a resposta do filtro é calculada segundo uma relação predefinida.

Os filtros podem ser divididos em duas classes: filtros lineares (Equação 2.13)

que são aqueles que suavizam, realçam detalhes na imagem e reduzem os efeitos do ruído sem alterar o nível de cinza médio da imagem; e os filtros não lineares os quais são aplicados sem a garantia da manutenção do nível médio de cinza da imagem. No decorrer do texto serão exemplificados ambos os tipos de filtros.

Uma importante questão a respeito da implementação de operações sobre vizinhança para filtros espaciais é sobre o que acontece quando o centro do filtro alcança a borda da imagem. Se o centro da máscara se move cada vez mais perto da borda, uma ou mais linhas ou colunas ficarão localizadas fora do plano da imagem. Há muitas maneiras de manipular essa situação. A mais simples é limitar o percurso da máscara para ficar em uma região onde a vizinhança está bem definida. Outro caminho é filtrar todos os *pixels* somente com a seção da máscara que está completamente contida na imagem. Outra solução inclui preencher a imagem adicionando linhas ou colunas com alguma constante em nível de cinza, ou preencher reaplicando linhas ou colunas - o preenchimento é removido ao final do processo. Entretanto, a única maneira de obter um resultado de filtragem perfeito é aceitar uma imagem filtrada um tanto menor, limitando o percurso do centro do filtro a uma distancia em que a vizinhança esteja bem definida - ou seja, o filtro pode ser aplicado completamente.

### 2.3.2 Operação de convolução

Em matemática, convolução é um operador matemático que, a partir de duas funções, produz uma terceira. Ela é definida como a integral do produto de uma das funções com uma cópia revertida e deslocada da outra. A função resultante depende do valor deste deslocamento. A Equação 2.2 representa o operador de convolução unidimensional contínuo onde  $f$  seria a função de ponderação, enquanto que cópias revertidas de  $g$  estariam sendo deslocadas e somadas ao resultado. Entretanto, a convolução não depende da ordem das funções de ponderação que podem ser tanto  $f$  quanto  $g$  produzindo o mesmo resultado, isto é, a operação de convolução é comutativa.

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (2.2)$$

Sempre que existirem transformações lineares e invariantes de um determinado sinal, pode-se falar em convolução. Ou seja, um sinal ao passar por um dispositivo

qualquer, vai certamente sofrer uma transformação, e é essa transformação que chamamos convolução. Essa característica justifica plenamente o interesse existente no estudo dessa operação matemática, pois ela é essencial para sabermos o sinal que está na origem ou, pelo contrário, transformar o sinal original naquele que desejamos obter no final.

As convoluções são definidas no domínio contínuo, mas devido à necessidade de implementação por muitos dispositivos eletro-eletrônicos, o operador é discretizado, o que significa, em termos práticos, a alteração da integral pelo somatório. Define-se a convolução discreta unidimensional Equação 2.3, entre as funções  $f$  e  $g$ , no ponto  $n$ , como sendo:

$$(f * g)(n) = \sum_m f(m)g(n - m) \quad (2.3)$$

### 2.3.3 Convolução em processamento digital de imagens

Em processamento digital de imagens, utiliza-se o operador de convolução bidimensional discreta (Equação 2.4), definido por:

$$g_{i,j} = \sum_{a=0}^{R-1} \sum_{b=0}^{C-1} f_{a,b} h_{i-a,j-b}, \quad i = 0, 1, \dots, R - 1, \quad j = 0, 1, \dots, C - 1. \quad (2.4)$$

E para aplicação da Equação 2.4, deve-se considerar nulos os valores indefinidos de  $f$  e  $h$ .

Os mecanismos de convolução no domínio do espaço estão ilustrados na Figura (2.3). O processo consiste simplesmente em mover a máscara convolucional - também chamada de filtro - de ponto a ponto em uma imagem. A cada ponto  $(x, y)$ , a resposta do filtro naquele ponto é calculada. Para a filtragem espacial linear a resposta é dada pela soma dos produtos entre os coeficientes do filtro e os pixels correspondentes na imagem na área coberta pela máscara convolucional [Gonzales e Woods, 2000].

### 2.3.4 Filtros de suavização (Passa-baixas)

Os filtros de suavização (*smoothing*) ou filtros de média (passa-baixas) tem o objetivo de atenuar (ou eliminar) ruído e/ou remover detalhes (elementos de alta frequência)

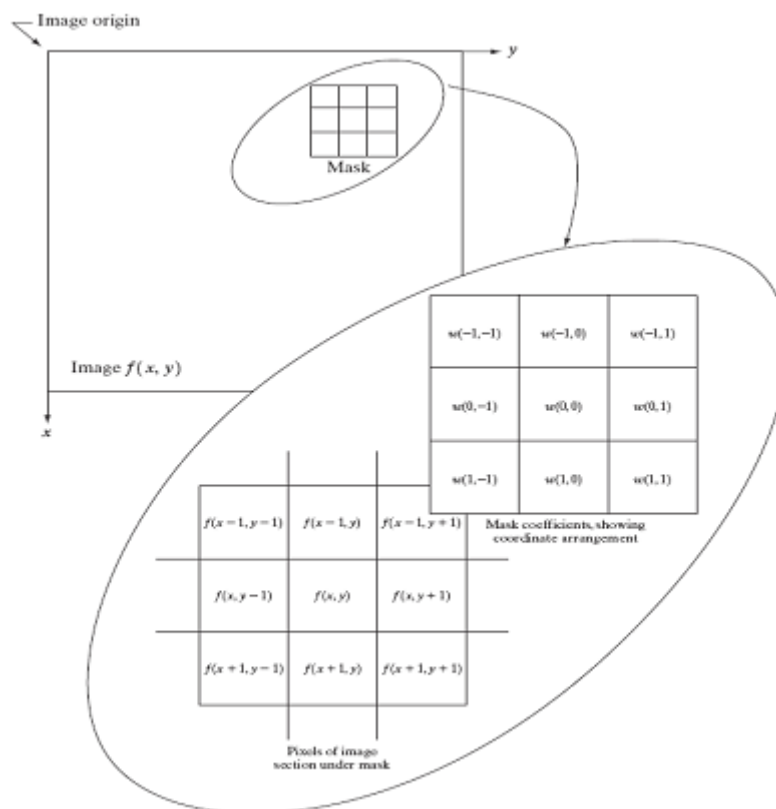


Figura 2.3: Mecanismo da operação de convolução no domínio espacial

em uma imagem. Além disso, o filtro de suavização ameniza as transições bruscas de níveis de cinza.

O filtro da média tem o efeito indesejado de diminuir a resolução da imagem o que a torna levemente borrada interferindo na nitidez da imagem.

Um tipo de filtro de suavização especial é o filtro da mediana. Em Teoria da Probabilidade e em Estatística, a mediana é uma medida de tendência central, um número que caracteriza as observações de uma determinada variável de tal forma que este número (a mediana) de um grupo de dados ordenados separa a metade inferior da amostra, população ou probabilidade de distribuição, da metade superior. Mais concretamente, metade da população terá valores inferiores ou iguais à mediana e a outra metade da população terá valores superiores ou iguais à mediana.

Em casos de populações ( $n$ ) ímpares, a mediana será o elemento central  $(n+1)/2$ . Para os casos de populações ( $n$ ) pares, a mediana será o resultado da média simples dos elementos  $n/2$  e  $(n/2)+1$ .

Para a seguinte população: 1, 3, 5, 7, 9 - a mediana é 5 (igual à média). No

entanto, para a população: 1, 2, 4, 10, 13 - a mediana é 4 (enquanto a média é 6). Para a população par: 1, 2, 4, 7, 9, 10 - a mediana é  $(4+7)/2$ , que é 5.5

O filtro da mediana possui as mesmas características do filtro da média com a peculiaridade de não diminuir a resolução da imagem e assim, não alterar as suas bordas. Este filtro pertence à categoria do filtro não-lineares (não mantém o nível médio de cinza da imagem).

### 2.3.5 Filtros de realce (Passa-altas)

Os filtros de realce ou aguçamento (*sharpening*) tem por objetivo realçar os detalhes de uma imagem. O efeito visual é o de realce de contraste, o que torna mais nítidas as transições (bordas). A ênfase nas altas frequências dada pelo filtro de aguçamento gera o efeito indesejado de aumento do ruído presente na imagem.

### 2.3.6 Filtros de detecção de bordas

O problema de detecção de borda é o de indicar uma alteração súbita do nível de cinza entre duas regiões em uma imagem. Os detectores de borda evidenciam características como bordas, linhas, curvas e manchas. Os filtros de detecção de borda de uma imagem são baseados no operador derivada. O cálculo da primeira e segunda derivada de uma função retornam o gradiente e o Laplaciano, respectivamente.

Seja uma função  $f(x, y)$ , o gradiente de  $f$  para as coordenadas  $(x, y)$  é o vetor definido por

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (2.5)$$

O módulo ou magnitude do vetor é dado por

$$\begin{aligned} \nabla &= \text{mag}(\nabla f) \\ &= [G_x^2 + G_y^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Levando em consideração os termos quadráticos e a raiz quadrada da Equação 2.6, para efeito de implementação o valor da magnitude do gradiente é aproximado

pela Equação 2.7

$$\nabla f \approx |G_x| + |G_y|. \quad (2.7)$$

A *direção* é também um item a ser considerado. A direção do vetor  $\nabla f$  no ponto  $(x, y)$  é o ângulo com respeito ao eixo-x determinado por

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1} \left( \frac{G_y}{G_x} \right) \quad (2.8)$$

O vetor gradiente é perpendicular à direção de uma borda qualquer da imagem no ponto  $(x, y)$ .

Os filtros mais comuns que utilizam o operador gradiente para detecção de borda são o filtro de Roberts, de Sobel e de Prewitt. Estes filtros utilizam a aproximação para calcular as derivadas das máscaras. Seja a máscara  $3 \times 3$  denotada na Tabela (2.3.6).

$f(x-1, y-1)$	$f(x-1, y)$	$f(x+1, y+1)$
$f(x, y-1)$	$f(x, y)$	$f(x, y+1)$
$f(x+1, y-1)$	$f(x+1, y)$	$f(x+1, y+1)$

Oportunamente a máscara será representada pelas entradas da Matriz (2.3.6),

$z_1$	$z_2$	$z_3$
$z_4$	$z_5$	$z_6$
$z_7$	$z_8$	$z_9$

A aproximação da derivada, proposta por Roberts, conhecida como operação cruzada de Roberts é dada por:

$$G_x = f(x+1, y+1) - f(x, y) \quad \text{e} \quad G_y = f(x+1, y) - f(x, y+1) \quad (2.9)$$

E, portanto, o gradiente é calculado com base na Equação 2.6, logo

$$\nabla f = \left[ (f(x+1, y+1) - f(x, y))^2 + (f(x+1, y) - f(x, y+1))^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.10)$$

Para efeito de implementação a aproximação do gradiente é

$$\nabla f \approx |f(x+1, y+1) - f(x, y)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)|. \quad (2.11)$$

O operador gradiente de Roberts é representado por duas componentes: a horizontal  $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$  e a componente vertical  $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ .

As imagens resultantes possuem altos valores de nível de cinza nas regiões com contraste bem definido e valores baixos de níveis de cinza em regiões com pouco contraste. Nas regiões de nível de cinza constante o valor dos pixels é zero. O operador gradiente de Roberts apresenta a desvantagem de não respeitar algumas direções de bordas (assimetria). Algumas bordas, dependendo da sua direção, são mais realçadas que outras.

O operador gradiente de Sobel usa as máscaras:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

As máscaras do operador de Sobel fornecem maior importância ao ponto do centro da imagem, isso se deve ao peso dois que são atribuídos aos pixels da coluna central das máscaras. A implementação deste operador utiliza as Equações (2.12) e (2.13).

$$\nabla f \approx |(z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3)| + |(z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)|. \quad (2.12)$$

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t) f(x + s, y + t) \quad (2.13)$$

O operador de Sobel realça as linhas verticais e horizontais mais escuras do que o fundo da imagem sem que pontos isolados sejam também realçados.

O operador gradiente de Prewitt usa as máscaras

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

O operador de Prewitt é semelhante ao operador de Sobel. O operador de Prewitt retorna bordas onde o gradiente é máximo utilizando, para isto, a aproximação da derivada.

Os operadores de Sobel e Prewitt, na prática, estão entre os mais utilizados para cálculo de gradientes em imagens digitais. O operador de Sobel possui a vantagem de

suprimir com mais eficiência o ruído nas imagens ao passo que as máscaras do operador de Prewitt são mais simples de implementar.

### 2.3.7 Filtros no domínio da frequência

Nas últimas seções o foco voltou-se para técnicas de realce de imagens utilizando o domínio espacial (o qual se caracteriza pelas operações realizadas diretamente nos pixels da imagem utilizando máscaras ou filtros em tal domínio). Neste momento, serão abordadas técnicas do processamento e da análise digital de imagens no domínio da frequência, o que requer o uso da transformada de Fourier.

O objetivo desta seção é relacionar as operações de realce de imagens com as técnicas da transformada de Fourier e o domínio da frequência. Antes, será apresentado um breve histórico da transformada de Fourier seguido de introdução e notação a respeito de cada uma das ferramentas citadas.

A transformada de Fourier nasce da contribuição legada pelo matemático francês Jean Baptiste Fourier (1768) em seu livro sobre teoria analítica do calor. No livro, publicado em 1822, Fourier afirmou que qualquer função periódica poderia ser expressa com soma de senos e co-senos de diferentes frequências não importasse o quão complicada fosse a função. Hoje, tal soma é conhecida como a série de Fourier. A ideia de Fourier para expressar funções como combinação linear de funções periódicas foi além. Estudos mostraram que essa representação não era privilégio das funções periódicas e, portanto, as funções não periódicas absolutamente integráveis (área finita abaixo da curva) também poderiam ser expressas como soma de senos e co-senos. Chama-se transformada de Fourier a representação de funções não periódicas em termos de soma de senos e co-senos.

Ambas as representações - séries de Fourier e transformada de Fourier - podem ser reconstruídas completamente por processos inversos sem perdas de informação. Essa importante característica possibilita o trabalho tanto no domínio de Fourier quanto no domínio original da função sem prejuízo das características funcionais.

### 2.3.8 Transformada de Fourier e domínio da frequência

Como continuação da Seção 2.3.7, introduz-se a transformada de Fourier uni e bi-dimensional sendo o foco voltado para as propriedades da formulação discreta em duas dimensões.

A transformada de Fourier,  $F(u)$ , de uma função contínua de uma variável  $f(x)$  é definida por

$$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-j2\pi ux} dx \quad (2.14)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ .

A transformada inversa é dada por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{j2\pi ux} du \quad (2.15)$$

O par de transformadas expressos pelas Equações (2.14) e (2.15) indicam que uma função pode ser restaurada sem perdas a partir da sua transformada.

A extensão para a transformada em duas variáveis é imediata:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)e^{-j2\pi(ux+vy)} dx dy \quad (2.16)$$

e a sua inversa,

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v)e^{-j2\pi(ux+vy)} dudv \quad (2.17)$$

Como o trabalho é voltado para imagens digitais então o foco volta-se principalmente para as transformações discretas, portanto apresentam-se as transformadas discretas de Fourier em uma e em duas dimensões.

A transformada de Fourier de uma função discreta de uma variável,  $f(x)$  com,  $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ , é dada por

$$F(u) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} f(x)e^{-\frac{j2\pi ux}{M}} \quad \text{para } u = 0, 1, 2, \dots, M - 1. \quad (2.18)$$

Analogamente, tem-se a transformada inversa discreta de uma variável

$$f(x) = \sum_{u=0}^{M-1} F(u)e^{\frac{j2\pi ux}{M}} \quad \text{para } x = 0, 1, 2, \dots, M - 1. \quad (2.19)$$

Para imagens (objetos de duas dimensões) defini-se como a extensão da transformada discreta de Fourier de uma dimensão a transformada discreta de Fourier bi-dimensional para uma função de duas variáveis  $f(x, y)$  - uma imagem - de tamanho  $M \times N$  dada por

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (2.20)$$

calculada para os valores de  $u = 0, 1, \dots, M - 1$  e  $v = 0, 1, \dots, N - 1$ .

Analogamente, tem-se a transformada inversa de Fourier discreta de em duas dimensões, dada por

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (2.21)$$

para  $x = 0, 1, \dots, M - 1$  e  $y = 0, 1, \dots, N - 1$ . O par de Equações (2.20) e (2.21) formam a Transformada Discreta de Fourier 2-D (TDF), onde  $u$  e  $v$  são as variáveis de frequência e  $x$  e  $y$  são as variáveis espaciais.

O espectro de Fourier (magnitude) e a fase (ângulo) são caracterizados pelo conjunto dos números complexos por

$$|F(u, v)| = [R^2(u, v) + I^2(u, v)]^{\frac{1}{2}} \quad (2.22)$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[ \frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right] \quad (2.23)$$

onde  $R(u, v)$  e  $I(u, v)$  são, respectivamente, a parte real e imaginária da função  $F(u, v)$ .

A Equação (2.20) estabelece a relação entre o que chama-se de domínio da frequência e o domínio do espaço em duas dimensões. Os valores da transformada de Fourier e os pares  $(u, v)$  variáveis de frequência é o que chama-se de domínio da frequência.

Diferente da análise de imagens no domínio do espaço onde é comum conseguir relacionar componentes específicos e sua transformada, na análise de imagens no domínio da frequência essa tarefa normalmente não é imediata. Os valores de  $F$  são obtidos a partir da operação entre  $f$  e termos exponenciais, portanto torna-se difícil fazer associações diretas entre elementos da imagem e os valores da transformada, exceto em

casos especiais. No entanto, podem ser estabelecidas algumas relações entre características espaciais e os componentes da TDF. Neste caso podem ser citados casos como mudanças bruscas em padrões de imagens, por exemplo a variação de intensidade. Se, de um ponto para outro em uma imagem a variação de intensidade é praticamente inexistente, gradual ou bastante lenta, então este trecho será representado por termos de baixa frequência da TFD. Contrariamente, em transições abruptas como bordas da imagem os componentes que o representarão são os de alta frequência.

Um *filtro* ou *função de transferência* é uma função  $H(u, v)$  que tem por finalidade suprimir frequências previamente determinadas em uma dada transformada.

No domínio da frequência o filtro é aplicado na transformada, portanto

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \quad (2.24)$$

O uso dos filtros em imagens depende do resultado que é desejado, portanto uma breve descrição de alguns tipos de filtros e qual o efeito causado pelo seu uso é salutar.

Alguns filtros básicos são: passa-baixa, passa-alta e corta-faixa.

O filtro conhecido como passa-baixa é aquele que atenua altas frequências e não altera as baixas frequências. Não custa lembrar que as baixas frequências em uma imagem são responsáveis pela sua aparência geral, intensidade de cor, objetos e cenas predominantes.

Os aspectos do efeito de um filtro passa-baixa em uma imagem são a suavização ou atenuação de estruturas como bordas e transições bruscas tais como ruídos os quais são características associadas predominantemente a componentes de altas frequências.

O filtro conhecido como passa-alta é aquele que atenua baixas frequências e não altera as altas. As altas frequências em uma imagem são responsáveis pelos detalhes, bordas e ruído.

O principal efeito do filtro passa-alta em uma imagem é o aguçamento de suas estruturas, principalmente suas bordas e elementos de transição. Os detalhes em uma imagem submetida a uma filtro passa-alta ficam mais evidentes.

Por sua vez, o filtro corta-faixa é utilizado quando se quer verificar efeitos causados por componentes de frequência específicos. Neste filtro uma faixa de frequência é escolhida e suprimida. Este filtro também é conhecido como rejeita-faixa.

## 2.4 Visualização 3D

A reconstrução da estrutura tridimensional (3D) de objetos a partir das suas imagens bi-dimensionais (2D) é um dos objetivos fundamentais em visão computacional. Forma a partir do foco (FPF) é um dos métodos utilizados para obter tal reconstrução.

A microscopia ótica convencional gera imagens 2D de objetos planos com alta qualidade de aumento e nitidez. Mas existe uma gama de objetos 3D onde a qualidade da imagem via microscopia ótica não é satisfatória. Informações importantes para distintas aplicações podem ser extraídas a partir de imagens de alta qualidade capturadas com auxílio de microscópio bem como de modelos 3D destes objetos.

Existem três métodos usuais para visualização 3D de objetos microscópicos:

[Niederost, Niederost e Scucka, 2004]

1. Microscopia eletrônica de varredura - MEV: dentre os três métodos é o que apresenta maior aumento dos objetos analisados. O preparo da amostra deve ser cuidadoso para não interferir no funcionamento do aparelho, por isto uma desvantagem deste método é o tempo necessário para o preparo da amostra além de ser um método de alto custo;
2. Microscopia estereoscópica: permite visualização e medição baseado na estereoscopia. Possui efeito temporário e não pode ser visualizado fora do aparelho.
3. Microscopia ótica: o procedimento de reconstrução de imagem é baseado na captura de uma pilha de imagens com diferentes profundidades de campo. A partir desta sequência um sistema de processamento de imagens seleciona apenas a porção em foco (corte ótico) de cada uma das imagens da pilha. Por fim é gerada uma única imagem obtida pela composição de todos os cortes óticos extraídos da sequência. O modelo espacial do objeto é obtido com base na profundidade estimada pelo distância focal da sequência de imagens.

## 2.5 Morfologia Matemática

Extrair componentes de interesse em uma imagem digital é um dos problemas fundamentais no processamento e análise de imagens [Francus, 2005]. A análise a que

uma imagem é submetida é, basicamente, dividida em duas etapas as quais auxiliam a extração de atributos para a classificação de objetos. Uma etapa refere-se à segmentação da imagem e a outra analisa quantitativamente os objetos segmentados.

A palavra morfologia possui significados distintos em diferentes áreas de estudo. Em lingüística, por exemplo, a morfologia estuda a estrutura das palavras. Em contrapartida, na biologia, morfologia descreve um ramo que trata da forma e estrutura dos animais e das plantas.

No que diz respeito à processamento de imagens e visão computacional usa-se morfologia matemática como uma ferramenta para a extração de componentes de imagens que sejam úteis na representação e descrição da forma de regiões tais como fronteiras, realces, esqueletização, segmentação, fecho convexo. Algumas técnicas morfológicas como *thinning*, poda (*pruning*) e filtragem morfológica são largamente usadas em pré e pós-processamentos.

A morfologia matemática foi formalizada a partir dos anos 60 com os trabalhos de G. Matheron e J. Serra do Centro de Morfologia Matemática da Escola de Minas de Paris. Os fundamentos da morfologia matemática baseiam-se na teoria dos conjuntos, geometria integral e álgebra de reticulados. Com a linguagem matemática da teoria dos conjuntos a morfologia oferece uma abordagem formal para problemas práticos e teóricos de processamento digital de imagens. Como veremos mais adiante a idéia principal do estudo de morfologia matemática é a extração de informações relativas a geometria e a topologia do conjunto desconhecido (imagem) e compará-lo com um conjunto bem-determinado chamado **elemento estruturante**. O elemento estruturante possui, em geral, características geométricas e/ou topológicas de acordo com as informações que pretendemos extrair no conjunto de interesse.

Nas seções que seguem os conceitos supra citados serão detalhados e formalizados.

### 2.5.1 Conjuntos

Nesta seção definem-se entes matemáticos referentes à conjuntos numéricos necessárias para o entendimento das estruturas das operações morfológicas. As definições apresentadas são de translação, reflexão e complemento de um conjunto e ainda diferença entre conjuntos.

**Definição 1** *Sejam  $A$  e  $S$  subconjuntos de  $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ , com  $a = (a_1, a_2) \in A$  e  $s = (s_1, s_2) \in$*

$S$ .

A translação do conjunto  $A$  pelo par ordenado  $x = (x_1, x_2)$ , denotada por  $(A)_x$ , é definida por

$$(A)_x = \{a' \mid a' = a + x = (a_1, a_2) + (x_1, x_2) = (a_1 + x_1, a_2 + x_2), \text{ para } a \in A\}.$$

A reflexão de  $S$ , denotada por  $\hat{S}$ , é definida como

$$\hat{S} = \{x \mid x = -b, \text{ para } b \in B\}.$$

O complemento do conjunto  $A$ , qualquer, é definido como

$$A^c = \{x \mid x \notin A\}.$$

A diferença entre os conjuntos  $A$  e  $S$ , denotada por  $A - S$ , é dada por

$$A - S = \{x \mid x \in A, x \notin S\} = A \cap S^c.$$

A partir destas operações com conjuntos pode-se definir as

### 2.5.2 Operações Morfológicas

As operações morfológicas têm como sua base de transformação o elemento estruturante. Podemos considerar estas operações como uma comparação entre o elemento estruturante que é previamente escolhido de acordo com a(s) estrutura(s) geométrica(s) requeridas e a imagem em questão. As operações morfológicas podem ser aplicadas em imagens binárias e em escala de cinza. Embora sejam tipos diferentes de imagens as definições das operações morfológicas para imagens binárias possuem extensões naturais para imagens em escala de cinza. Os principais operadores morfológicos são dilatação e erosão, a partir deles pode-se expressar outras operações morfológicas de maior complexidade.

O elemento estruturante é uma matriz usada para definir a forma e o tamanho de uma vizinhança para as operações morfológicas. A matriz do elemento estruturante é binária, ou seja, composta de 0's e 1's e pode ter forma e tamanho arbitrários. Os pixels de valor 1 do elemento estruturante definem a vizinhança deste elemento estruturante. Os elementos estruturantes podem ter duas ou três dimensões. Os elementos bi-dimensionais, ou *flat*, são matrizes formadas por 0's e 1's normalmente bem menores que as imagens que serão processadas. A origem do elemento estruturante, identifica

o pixel de interesse, ou seja, o pixel a ser processado. Os elementos estruturantes tridimensionais, ou *nonflat*, assim como os elementos bi-dimensionais, são matrizes formadas por 0's e 1's. A diferença está no fato de que os elementos de três dimensões possuem pesos associados aos pixels os quais definem a terceira dimensão.

A forma e o tamanho dos elementos estruturantes variam de acordo com o que se quer analisar. Se o objeto que se quer extrair em uma imagem tem forma linear o mais apropriado para usar são elementos estruturantes com forma linear. Embora existam inúmeros tipos de elementos estruturantes que possam ser usados os mais comuns são os mais simples. Entre eles temos:

- a. Linear - usados, frequentemente, para a extração de elementos alongados na imagem. O tamanho e a orientação são parâmetros importantes neste tipo de elemento estruturante;
- b. Circular - os discos são elementos estruturantes bastante utilizados. Duas aproximações de disco são a cruz elementar e o quadrado elementar;
- c. Elementos estruturantes compostos - elementos disjuntos que possuem a mesma origem.

## Dilatação

A dilatação é o processo de incorporar ao objeto todos os pontos do *background* que os tocam, deixando sua área maior. Por exemplo, usando um elemento estruturante adequado, se dois objetos em uma imagem estão separados por menos de três pixels, então a operação de dilatação morfológica fará com que estes elementos sejam conectados e se tornem um único objeto.

Genericamente falando, dilatar uma imagem é fazer com que pixels desconectados a uma distância menor do que o tamanho do elemento estruturante utilizado sejam conectados, agregando assim, mais elementos ao *foreground* da imagem aumentando-o em número de pixels. Esta, pois, é a proposta da operação de dilatação morfológica. A dilatação é útil para preencher vazios ou buracos entre objetos em uma imagem.

**Definição 2** *Sejam  $A$  e  $S$  subconjuntos do  $\mathbb{Z}^2$ . Definimos a operação de dilatação de um conjunto  $A$  por um conjunto  $S$  como*

$$A \oplus S = \{x \mid (\hat{S})_x \cap A \neq \emptyset\}, \quad (2.25)$$

onde  $\emptyset$  é o conjunto vazio e  $S$  é o elemento estruturante.

Interpretando o que representa esta operação temos que o processo de dilatação inicia-se com a reflexão do conjunto (que é a imagem)  $S$  em torno da origem e após uma translação do resultado por  $x$ . Assim, a dilatação da imagem  $A$  pelo elemento estruturante  $S$  é o conjunto de todos os deslocamentos  $x$  tais que  $\hat{S}$  e  $A$  se intersectam em, pelo menos, um elemento não nulo. Baseado nesta interpretação temos que a Equação (2.25) pode ser reescrita como

$$A \oplus S = \{x \mid [(\hat{S})_x \cap A] \subseteq A\}.$$

Alternativamente, ainda pode-se usar

$$A \oplus S = \{c \in \mathbb{Z}^2 \mid c = a + b, \text{ para algum } a \in A, b \in B\}$$

### Erosão

A erosão é um processo de eliminação dos pontos de fronteira de um objeto deixando-o com área, em pixels, menor em todo o seu contorno. Se dois objetos estão unidos por menos do que três pixels, estes serão desconectados pela operação de erosão tornando-se assim dois objetos. Objetos que são formados por uma quantidade de pixels, em qualquer de suas dimensões, menor do que a quantidade de pixels do elemento estruturante são eliminados da imagem. Por esta razão a operação de erosão é útil tanto para remover objetos muito pequenos em uma imagem quanto para separar objetos que se tocam.

**Definição 3** *Sejam  $A$  e  $S$  subconjuntos pertencentes a  $\mathbb{Z}^2$ . Define-se a operação de erosão de um conjunto  $A$  por um conjunto  $S$  como*

$$A \ominus S = \{x \mid (S)_x \subseteq A\}. \quad (2.26)$$

A erosão de  $A$  por  $S$  é o conjunto de todos os pontos  $x$  tais que  $S$ , quando transladado por  $x$ , fique contido em  $A$ . Uma definição alternativa de erosão é a que segue

$$A \ominus S = \{c \in \mathbb{Z}^2 \mid c + b \in A, \text{ para todo } b \in B\}$$

Na Figura (2.4) vê-se os efeitos das operações de dilatação (coluna da esquerda) e da erosão morfológica (coluna da direita) sobre uma imagem.

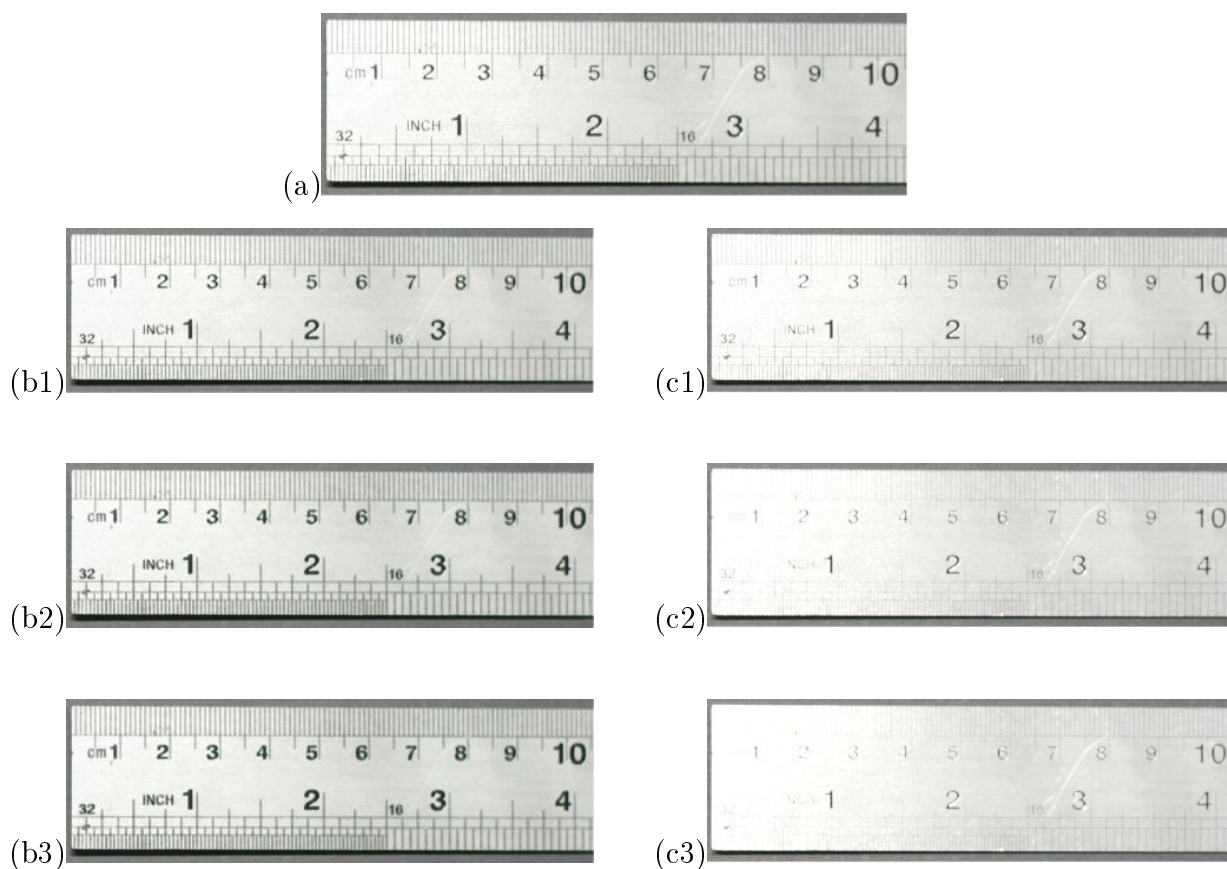


Figura 2.4: Dilatação e Erosão morfológicas: (a) imagem original; (b1), (b2), (b3) imagens dilatadas por elementos estruturantes de raios 1, 2, e 3, respectivamente; (c1), (c2), (c3) imagens erodidas por elementos estruturantes de raios 1, 2, e 3, respectivamente.

### 2.5.3 Abertura e Fechamento - Imagens Binárias

A combinação entre as operações morfológicas de erosão e dilatação conferem resultados interessantes e úteis no processamento de imagens. Dois exemplos destas combinações são as operações de abertura e fechamento morfológico.

Os efeitos da abertura morfológica em uma imagem são: eliminação de objetos pequenos e estreitos, quebra de objetos em pedaços menores e geralmente, a suavização do contorno sem mudança significativa na área da imagem.

**Definição 4** A abertura morfológica de  $A$  por  $S$ , denotada por  $A \circ S$ , é uma erosão de

A por  $S$  seguida de uma dilatação do resultado por  $S$ .

$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S.$$

Uma formulação matemática alternativa da abertura é

$$A \circ S = \bigcup \{(S)_z \mid (S)_z \subseteq A\} \quad (2.27)$$

onde  $\bigcup \{\cdot\}$  é a união arbitrária dos conjuntos. Uma interpretação geométrica da igualdade (2.27) é que a abertura  $A \circ S$  é a união de todas as translações de  $S$  que estão inteiramente contidas em  $A$ .

Na Figura (2.5) exemplifica-se a abertura morfológica. Neste caso, a operação morfológica tem a finalidade de eliminar os grãos pequenos e imperfeitos. A imagem da esquerda possui alguns pedaços de grãos remanescentes do processamento. Usando um elemento estruturante de raio 15 a imagem resultante da operação de abertura, exibida à direita, possui apenas os grãos inteiros, sem mais os pequenos objetos da imagem anterior.

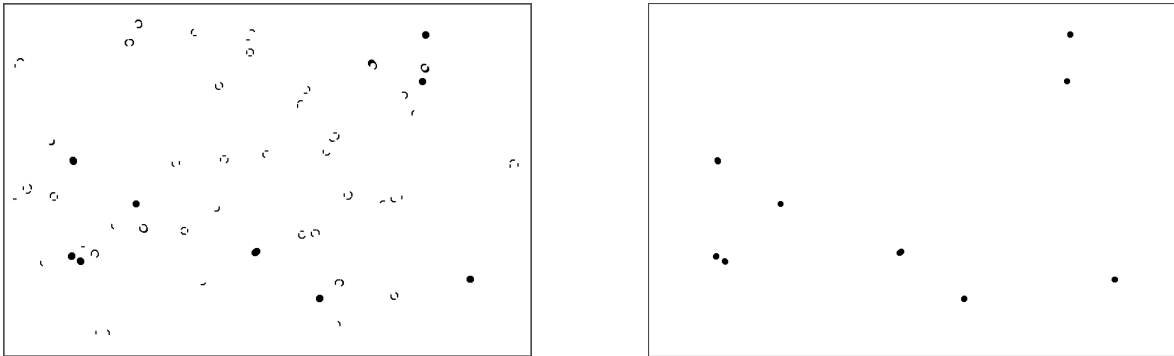


Figura 2.5: Efeito da abertura por elemento estruturante de raio 15

Os efeitos da operação fechamento morfológico em uma imagem são preenchimento de buracos de tamanho menor que o elemento estruturante, conexão entre objetos próximos entre si e, geralmente, suavização do contorno dos objetos sem mudança significativa em sua área.

**Definição 5** O fechamento morfológico de  $A$  por  $S$ , denotado por  $A \bullet S$ , é uma dilatação de  $A$  por  $S$  seguida de uma erosão do resultado por  $S$ .

Uma interpretação geométrica para o fechamento é:  $A \bullet S$  é o complemento da união de todas as translações de  $S$  que não sobrepõem  $A$ . Matematicamente temos que  $z$  é um elemento de  $A \bullet S$  se, e somente se,  $(S)_x \cap A \neq \emptyset$  para qualquer translação de  $(S)_x$  que contenha  $z$ .

### Propriedades

A operação de abertura satisfaz as seguintes propriedades: Sejam  $A, B, C$  imagens e  $S$  um elemento estruturante.

- a.  $A \circ S$  é um subconjunto de  $A$ ;  $A \circ S \subseteq A$
- b. Se  $B \subseteq C$ , então  $B \circ S \subseteq C \circ S$ ;
- c.  $(A \circ S) \circ S = A \circ S$ .

Semelhantemente, a operação fechamento verifica as propriedades abaixo: Sejam  $A, B, C$  imagens e  $S$  um elemento estruturante

- a.  $A$  é um subconjunto de  $A \bullet S$ ;  $A \subseteq A \bullet S$
- b. Se  $B \subseteq C$ , então  $B \bullet S \subseteq C \bullet S$ ;
- c.  $(A \bullet S) \bullet S = A \bullet S$ .

As propriedades ajudam no entendimento dos resultados quando aplicam-se as operações de abertura e fechamento na construção de filtros morfológicos.

### 2.5.4 Morfologia em Escala de Cinza

Nas Seções 2.5.2 e 2.5.3 apresentou-se operações morfológicas para imagens binárias. Nesta seção estender-se-á o conceito das operações dilatação, erosão, abertura e fechamento para imagens em escala de cinza. Assim como em seções anteriores a morfologia em níveis de cinzas presta-se para a extração de elementos de uma imagem que sejam úteis para a descrição e representação de formas.

Embora as finalidades e efeitos das operações morfológicas em imagens binárias e imagens em escala de cinza sejam praticamente os mesmos uma diferença de processamento pode ser citada. O custo computacional para o processamento de imagens em escala de cinza é maior do que o requerido para o processamento de imagens binárias.

A notação  $f(x, y)$  representa as imagens em níveis de cinza. Assume-se que estas funções são discretas, isto é,  $(x, y) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$  e  $f$  é uma função que assume um valor que representa um nível de cinza para cada  $(x, y)$  arbitrado.

## Dilatação

Sejam  $f$  uma imagem em escala de cinza e  $s$  um elemento estruturante.

**Definição 6** *Define-se a operação de dilatação de  $f$  por  $s$  como,*

$$(f \oplus s)(u, v) = \max\{f(u - x, v - y) + s(x, y) \mid (u - x), (v - y) \in D_f; (x, y) \in D_s\},$$

sendo que  $D_f$  e  $D_s$  são os domínios de  $f$  e  $s$  respectivamente.

Notação:  $f \oplus s$  representa a dilatação de  $f$  por  $s$ .

Nas imagens binárias a dilatação do conjunto  $A$  (imagem) pelo conjunto  $s$  (elemento estruturante) ocorre a partir das transformações exercidas pelo elemento estruturante sobre a imagem a ser dilatada nos pontos de interseção entre esses conjuntos. No caso das imagens em níveis de cinza esta transformação ocorre desde que os parâmetros de deslocamento  $(u - x)$  e  $(v - y)$  pertençam ao domínio de  $f$ . elemento estruturante é deslocado ao longo de toda a imagem para transformá-la, nesta definição de dilatação em escala de cinza temos que a imagem  $f$  é que é deslocada ao invés do elemento estruturante.

Os efeitos da dilatação de uma imagem em níveis de cinza, considerando que os valores dos pixels na operação são calculados como o máximo de  $(f + s)$  em uma vizinhança definida pela forma do elemento estruturante, baseiam-se em:

- a. Imagem de saída mais clara que a imagem de entrada se a matriz do elemento estruturante for formado por elementos positivos;
- b. Detalhes escuros na imagem são reduzidos ou eliminados de acordo com a relação entre os pixels destas áreas da imagem e os valores de entrada do elemento estruturante em questão.

## Erosão

Seja  $f$  uma imagem em escala de cinza e  $s$  um elemento estruturante.

**Definição 7** *Define-se a operação de erosão de  $f$  por  $s$  como,*

$$(f \ominus s)(u, v) = \min\{f(u + x, v + y) - s(x, y) \mid (u + x), (v + y) \in D_f; (x, y) \in D_s\}$$

onde  $D_f$  e  $D_s$  são os domínios de  $f$  e  $s$ , respectivamente.

Notação:  $f \ominus s$  representa a erosão de  $f$  por  $s$ .

Nas imagens binárias a operação de erosão conta com um elemento estruturante completamente contido na imagem a ser erodida, analogamente temos que os parâmetros de deslocamento  $(u + x)$  e  $(v + y)$  das imagens em escala de cinza devem estar contidos no domínio de  $f$ .

Diferentemente do que ocorre no caso das imagens binárias onde é o elemento estruturante que é deslocado sobre a imagem na morfologia em níveis de cinza o deslocamento é realizado pela própria imagem  $f$  a ser transformada.

A erosão baseia-se na escolha do valor mínimo de  $(f - s)$  em uma vizinhança definida pela forma do elemento estruturante, assim temos dois efeitos gerais da erosão sobre uma imagem:

- a. Imagem de saída mais escura do que a imagem de entrada se todas as entradas do elemento estruturante forem positivas;
- b. De acordo com a forma e os valores dos pixels do elemento estruturante e com os detalhes intrínsecos da imagem, locais claros na imagem de entrada que forem menores, em área, comparados ao elemento estruturante são reduzidos.

### Abertura e Fechamento - em escala de cinza

Não há diferença de definição entre as operações de abertura e fechamento para imagens em escala de cinza e imagens binárias. Sendo assim, sejam  $f$  uma imagem em nível de cinza e  $s$  um elemento estruturante.

**Definição 8** *Define-se abertura de  $f$  por  $s$ , denotada por  $f \circ s$ , como a erosão de  $f$  por  $s$  seguida da dilatação do resultado por  $s$ . Matematicamente,*

$$f \circ s = (f \ominus s) \oplus s.$$

**Definição 9** *Define-se fechamento de  $f$  por  $s$ , denotada por  $f \bullet s$ , como a dilatação de  $f$  por  $s$  seguida da erosão do resultado por  $s$ . Matematicamente,*

$$f \bullet s = (f \oplus s) \ominus s.$$

Os efeitos da abertura em uma imagem em escala de cinza são:

- a. A erosão inicial remove detalhes claros na imagem. O elemento estruturante usado vai ditar o tamanho dos detalhes que são removidos;

- b.** Além da remoção dos detalhes claros na imagem a erosão ainda escurece uniformemente toda a imagem;
- c.** A dilatação subsequente eleva a claridade na imagem sem restaurar os detalhes claros removidos pela erosão.

Por sua vez, os efeitos do fechamento morfológico em escala de cinza são;

- a.** A dilatação inicial remove detalhes escuros na imagem. O tamanho dos detalhes removidos são baseados no elemento estruturante em uso;
- b.** A imagem é clareada pela dilatação;
- c.** A erosão subsequente escurece a imagem sem que os detalhes removidos pela dilatação sejam restaurados.



# Capítulo 3

## Materiais e Métodos

Neste capítulo, propõe-se um método para redução de erros de predição (aproximação por esferas) em medições sem contato baseado na recuperação de informações tridimensionais de objetos a partir de uma coleção de imagens (bidimensionais). A preparação da amostra, bem como a descrição do instrumento para medição utilizado, também são objetivos deste capítulo.

### 3.1 O Método Proposto

A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do método proposto. O método é dividido em 4 etapas principais:

1. Amostra - Peneiramento; pesagem; amostragem (quarteamento).
2. Aquisição - Pilha de imagens.
3. Processamento 1 - Peneiramento computacional (medição 2D) e contagem de partículas.
4. Processamento 2 - Medição 3D

Cada uma das etapas listadas acima possui subetapas que serão detalhadas nas próximas seções.

#### 3.1.1 Amostra

A vermiculita é um mineral da família das argilas micáceas formado essencialmente por silicatos hidratados de alumínio e magnésio. Quando submetida a um aque-



Figura 3.1: Diagrama em blocos do processo de medição sem contato

cimento adequado a água contida entre as suas milhares de lâminas se transforma em vapor fazendo com que as partículas expandam e se transformem em flocos sanfonados aumentando o grão da vermiculita de 8 a 12 vezes. Os espaços vazios originados desta expansão volumétrica são preenchidos por ar o que confere à vermiculita expandida leveza, isolamento térmica e absorção acústica.

O produto obtido é inífungo, inodoro, não irrita a pele e nem os pulmões, não conduz eletricidade, é isolante térmico e absorvente acústico; não se decompõe, não deteriora e nem apodrece; não atrai cupins ou insetos; é somente atacado pelo ácido fluorídrico a quente; pode absorver até cinco vezes o seu peso em água, é lubrificante e tem as características necessárias aos materiais filtrantes.

#### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.

Massa específica aparente:  $80 - 100 \text{Kg}/\text{m}^3$ .

Condutividade térmica máxima à temperatura ambiente:  $0,070 \text{W}/\text{m.K}$ .

Temperatura de amolecimento:  $1.300^\circ\text{C}$ .

Umidade máxima: 7,0%.

Coeficiente de absorção acústica a  $1.000 \text{Hz}$  : 0,50.

O maior atrativo pela vermiculita em detrimento de outros possíveis minérios,

Tabela 3.1: Distribuição granulométrica da amostra de minério - vermiculita

Número da peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)
12	1,70mm	8,29g
16	1,18mm	36,16g
30	0,60mm	19,89g
40	0,42mm	2,39g
50	0,30mm	2,05g

por exemplo o caulim, deve-se a alta desagregação entre suas partículas o que facilita o processamento morfológico no que diz respeito ao tratamento de partículas que se tocam ou se sobrepõem.

A amostra separada para testes apresenta distribuição granulométrica de acordo com a Tabela 3.1.

### 3.1.2 Aquisição de imagens

Para trabalhar com processamento e análise de imagens é necessário tomar precauções quanto à qualidade e o tipo de imagens utilizadas, pois, a depender das condições e instrumentos usados na captura da imagem a informação que ela contém pode não ser suficiente para que conclusões seguras sejam alcançadas. Um exemplo são as imagens do tipo JPEG (*Joint Photographic Experts Group*) que evidenciam a qualidade visual em detrimento da quantidade de informação devido ao tipo de compressão de dados utilizado (compressão com perdas de informação).

As imagens processadas e analisadas neste trabalho foram capturadas no formato RAW ("cru" em inglês) que significa que a imagem capturada não sofre compressão de dados ou a compressão não é realizada com perdas de informação. As imagens processadas são do tipo TIFF (*Tagged Image File Format*) outro formato que a compressão de dados não exclui informações da imagem. O amplo reconhecimento do formato TIFF, em relação ao RAW pelos *softwares* de processamento e análise de imagens, justifica a sua utilização.

Os materiais usados para a aquisição das imagens foram:

- a. Câmera Fotográfica Digital EOS Digital SLR Camera - Rebel XT<sub>i</sub> da Canon, equipada com objetiva de 50mm; Figura 3.2

A câmera fotográfica é um equipamento de alta performance que possui sensor de captura de imagem com 10.5 megapixels de resolução máxima e 10.1 megapixels de resolução efetiva. O tamanho do sensor é  $22.2mm \times 14.8mm$  com proporção de pixels de 3:2. Os  $3904 \times 2598$  pixels efetivos produzem imagem com resolução máxima de  $3888 \times 2592$  pixels nos formatos CR2 (*Canon Raw 2*) e JPEG. O formato do tipo CR2 é usado para imagens sem compressão com perdas, as chamadas imagem RAW; o formato JPEG, mesmo possuindo a mesma resolução, é submetida à compressão com perdas.

A câmera é dotada de controles manuais para nove pontos de opções para foco, oito tipos de balanço de branco, velocidade do obturador que vai desde  $\frac{1}{4000}$  até 30 segundos, controle de exposição.

Uma importante característica da câmera é a interação câmera-software. Com um cabo de dados USB, pode-se capturar imagens a partir de comandos computacionais.

**b.** Microscópio estereoscópio trinocular; Figura 3.3

O estereoscópio trinocular fabricado pela TAIMIN permite a associação com dispositivos de captura de imagem através da lente localizada acima do aparelho vide Figura 3.4.

A ampliação do aparelho é de 10x a 200x (dependendo da composição das objetivas e oculares), objetiva zoom: 1X a 4X em movimento giratório e botões bilaterais, Objetiva auxiliar 2X. Distância do trabalho variável dependendo da objetiva utilizada podendo variar de  $32,5mm$  até  $189mm$ , distância interpupilar de 48 a  $75mm$  e ajuste de dioptria nas duas portas de  $\pm 5$  dioptria, inclinado  $45^\circ$  e giro do corpo óptico  $360^\circ$ . Iluminação: Transmitida 12V/10W por lâmpada de halogênio. Refletida 12V 10W Lâmpada de halogênio. Seletor acoplado a base com três funções transmitida, refletida e simultaneamente. Controle independente de intensidade luminosa e iluminação.

Utilizando estes equipamentos foi possível capturar imagens para posterior processamento e análise, no entanto, a captura era limitada à informação bidimensional da



Figura 3.2: Câmera



Figura 3.3: Microscópio



Figura 3.4: Associação

amostra. Para obter informação da altura das partículas o microscópio estereoscópio trinocular foi submetido a algumas adaptações.

Com o auxílio de professores e técnicos do Laboratório de Física Experimental - Ótica da UFPB um transferidor foi adaptado ao ajuste de foco do estereoscópio para que a altura das partículas pudesse ser medida. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram o antes e o depois da adaptação.



Figura 3.5: Microscópio



Figura 3.6: Instrumento de Medição

Com a implantação do transferidor e da agulha de referência é possível, a partir da graduação do transferidor e do foco das imagens, estimar a altura dos objetos da amostra. Maiores explicações sobre o método de medição na Seção 3.1.4

### 3.1.3 Processamento das imagens 1

O bloco de processamento 1 das imagens presta-se para possíveis pré-processamentos tais como correção de iluminação, contraste ou aplicação de filtros, embora primordialmente, este módulo sirva para peneirar computacionalmente as partículas via morfologia matemática (granulometria) e realizar a contagem dos objetos presentes na imagem.

Para corrigir a iluminação de uma imagem usaram-se as ferramentas da morfologia matemática, assim como realce de contraste via equalização de histograma. Antes do pré-processamento as imagens que foram capturadas em RGB (*Red-Green-Blue*, isto é, imagens coloridas) são transformadas para escala de cinza (*gray scale*).

A separação dos grãos, por morfologia matemática ou peneiramento computacional, é feita a partir de uma imagem binária resultante do tratamento de uma imagem em escala de cinza que passara por equalização e adaptação de histograma, como citado acima. Se a imagem a ser tratada não precisar de correção de iluminação, então o passo anterior (correção da iluminação) se reduz apenas à binarização da imagem. De posse da imagem binária, faz-se uma abertura morfológica usando um elemento estruturante escolhido de acordo com o tamanho dos grãos. Esta escolha é baseada nos grãos de menor e maior tamanho na imagem dados por uma simulação computacional do processo de peneiramento onde é gerado um gráfico - Figura 3.7 - indicando os raios dos grãos da imagem em questão.

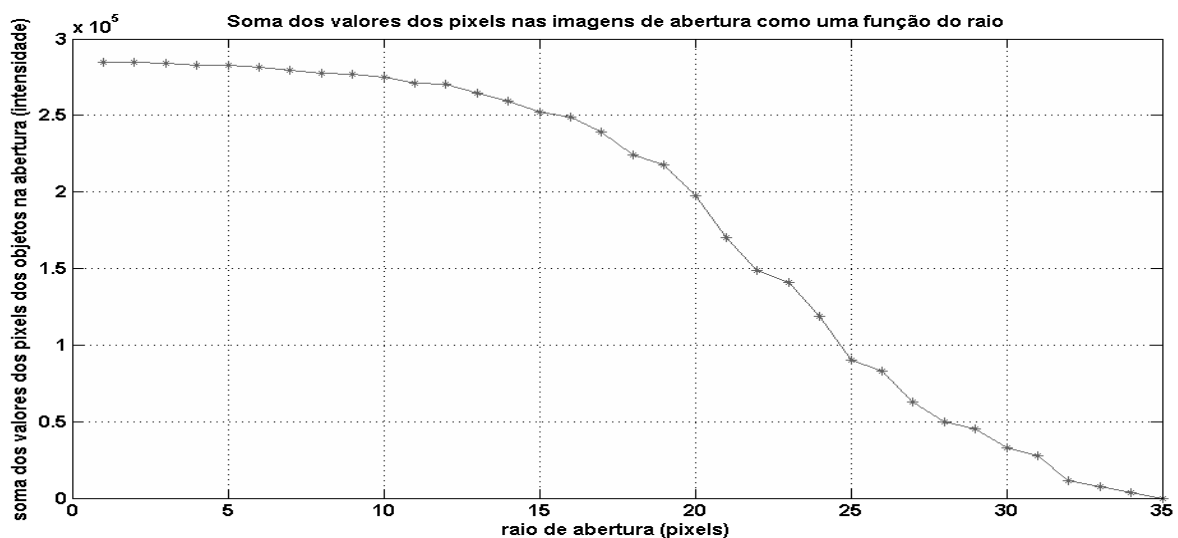


Figura 3.7: Simulação do peneiramento computacional

O próximo passo consiste em excluir os grãos que intersectam-se com as fronteiras da imagem. Esse passo é realizado usando a função `imclearborder` do *MatLab*<sup>®</sup>. Esta exclusão é feita porque, do contrário, tanto a estimativa do número de objetos na imagem seria prejudicada quanto a estimativa do tamanho dos grãos. Um grão que toque na fronteira da imagem não pode ser medido com exatidão pois ele não está totalmente contido no campo visível [Barbosa, J.J. et al., 2007].

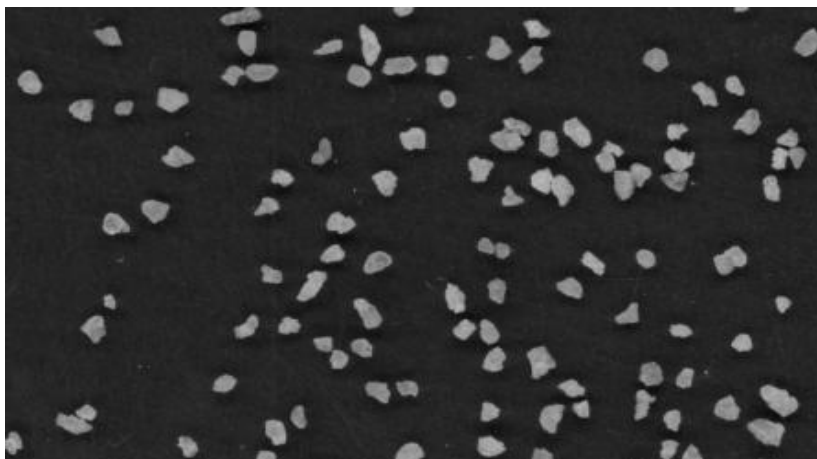


Figura 3.8: Areia Malha 16 - interseção de grãos com as fronteiras da imagem

Calculam-se o menor e o maior elemento estruturante referente à imagem em processamento. A rotina continua com a separação dos grãos, baseado nas suas dimensões desde os menores grãos até os maiores. A separação é feita pela subtração entre as imagens processadas pelo elemento estruturante de raios  $x$  e  $x + n$ . Partículas de raio até 20 pixels o incremento  $n$  utilizado é  $n = 1$ . Por exemplo, para obter os grãos de raio igual a 10 pixels em uma imagem faz-se a subtração entre as imagens processadas com elementos estruturantes de raios 10 e 11 pixels.

$$Im_{10} - Im_{11} = \text{imagem com grãos de dez pixels de raio}$$

Onde,  $Im_x$  é a imagem processada com elemento estruturante de raio  $x$ .

Partículas de raio maior do que 20 pixels o valor do incremento é  $n = 5$ , por exemplo, para separar os grãos de raio igual a 30 pixels em uma imagem efetua-se a subtração entre as imagens processadas com elementos estruturantes de raios 30 e 35 pixels.

$$Im_{30} - Im_{35} = \text{imagem com grãos de 30 pixels de raio}$$

Onde,  $Im_x$  é a imagem processada com elemento estruturante de raio  $x$ .

E assim, de acordo com os raios exibidos pela Figura 3.7 determinam-se os raios utilizados para o peneiramento computacional.

A rotina computacional procede desta maneira para todos os elementos estruturantes de diferentes raios.

Para os produtos das peneiras de número 16, 30 e 40 na Tabela 4.1 utilizadas no processo foram medidas a altura média das partículas. Por volta de 20 partículas tomadas aleatoriamente segundo a amostragem de quarteamento resultaram nas alturas médias apresentadas na Tabela 4.2.

A comparação entre o diâmetro e a altura das partículas foi realizada de acordo com os resultados do peneiramento computacional (distribuição do tamanho das partículas em raios) e das alturas médias em cada peneira. A hipótese desta comparação é baseada no princípio que as partículas tendem a repousar na posição de energia mínima o que leva a crer que a menor dimensão na maioria das partículas seria a sua altura. A partir do raio das partículas e da sua altura foi possível estimar o volume da cada partícula.

Por fim, exibe-se o histograma do número de pixels dos grãos versus quantidade de grãos da imagem processada como mostra a Figura 3.9.

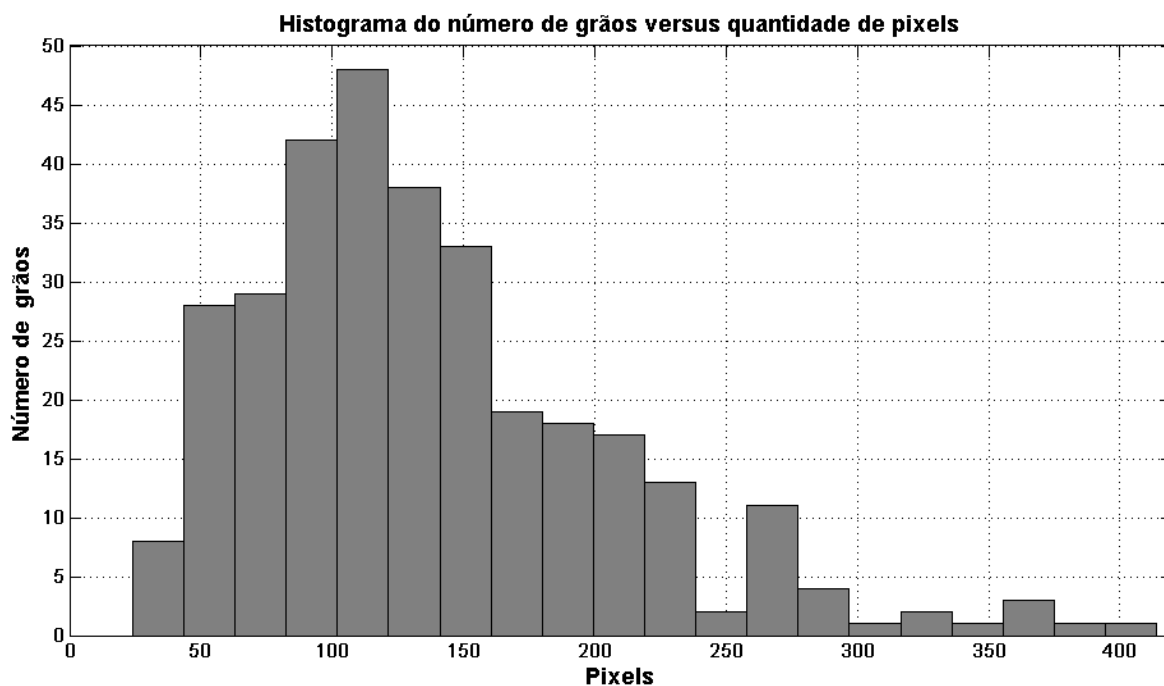


Figura 3.9: Histograma da contagem de grãos

### 3.1.4 Processamento das imagens 2

A recuperação de características de objetos em imagens para determinação da sua forma tridimensional pode ser obtida a partir de diversos métodos. Dentre três métodos previamente testados (forma a partir da sombra - SFS, forma a partir da visão estereoscópica e forma a partir do foco - SFF) o método eleito para ser investigado foi recuperação de forma a partir do foco - SFF (*shape from focus*) por ter se mostrado como o método mais robusto a alterações de *set-up*.

A associação entre o microscópio estereoscópio e a câmera produz imagens com aumento de até 200x e, portanto, profundidade de campo pequena, por isso, não é possível capturar imagens de objetos tridimensionais completamente em foco com apenas uma imagem.

No método da SFF, que será utilizado neste trabalho, capturam-se uma sequência de imagens, mostrada na Figura (3.10), que são obtidas pela variação gradual do foco ao longo do objeto desde sua base até o topo, em outras palavras, SFF é um método que determina a profundidade de uma sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco. A partir das regiões em foco das imagens da pilha é possível compor uma única imagem completamente em foco.

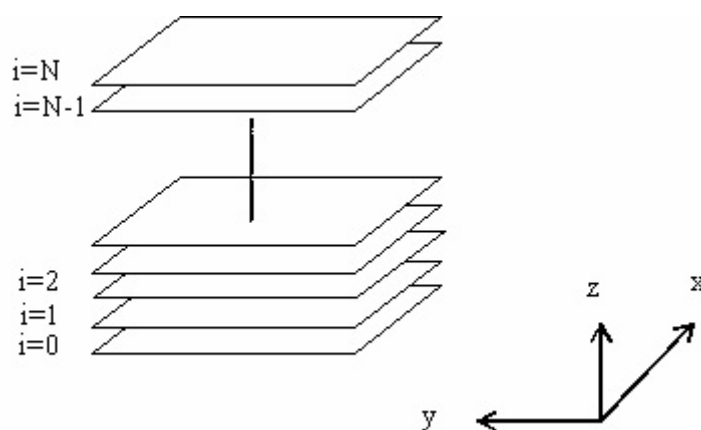


Figura 3.10: Sequência de imagens capturadas com diferentes ajustes de foco

As imagens são capturadas a partir da base até o topo dos objetos. De posse da pilha de imagens e utilizando o *ImageJ* realizam-se três etapas: 1. registro ou alinhamento das imagens; 2. composição das imagens da pilha em uma única imagem completamente em foco e 3. cálculo do mapa de altitudes.

Quando da aquisição da pilha de imagens por ocasião das sucessivas mudanças de foco pode ocorrer que as imagens não alinhem-se completamente o que resultaria em deslocamentos em direções diversas (eixos  $x$  e/ou  $y$ ) que não apenas o deslocamento da altura (eixo  $Z$ ). O registro (ou alinhamento) das imagens propõe-se a corrigir erros humanos ou do(s) instrumento(s) na aquisição das imagens.

O passo após o alinhamento das imagens é o da composição das imagens da pilha em uma completamente em foco. A imagem completamente em foco é composta pelas regiões em foco de cada imagem  $i$  da pilha. Ainda baseado na pilha de imagens o mapa de altitudes é calculado. O mapa de altitudes ou mapa de alturas é uma imagem de índices onde o valor de cada pixel refere-se à posição  $i$  relativa à imagem da pilha onde aquele pixel está completamente em foco. Por exemplo, um pixel com índice  $i = 6$  provém da imagem  $i = 6$  da pilha de imagens. O índice da imagem indica a altura daquele ponto.

## 3.2 Ambientes de programação

Os códigos e testes foram desenvolvidos para Matlab e para ImageJ.

O Matlab<sup>®</sup>, é um *software* amplamente difundido no meio acadêmico e fora dele. As vantagens do uso deste *software* é a relativa facilidade de operação se for levado em conta outras linguagens de programação, a variedade de funções pré-definidas e a possibilidade da interação com outras linguagens computacionais (C, C++, Java) ou da implementação das próprias rotinas de programação no próprio Matlab.

Outra vantagem, e esta bem específica em relação a um dos problemas que este trabalho trata, é que o Matlab<sup>®</sup> dispõe do *image processing toolbox* que é um conjunto de ferramentas próprias para o trato com o processamento de imagens.

Por sua vez, o *ImageJ* é um programa de processamento e análise de imagens de código aberto baseado na linguagem JAVA. O *ImageJ* exibe, edita, analisa, processa, salva e imprime imagens em 8 bits, 16 bits e 32 bits. Lê diversos formatos de imagens dentre eles TIFF, GIF, JPEG, BMP. O principal motivo por escolher o *ImageJ* para trabalho é sua capacidade de suportar a leitura de sequência de imagens "stacks". Esta característica é útil quando trabalha-se com pilhas de imagens. Além disso, como é uma programa de código aberto existem *plugins* disponíveis para uso na página do

*ImageJ* bem como é possível desenvolver e adicioná-los ao programa de acordo com a necessidade.

### 3.3 Calibração do instrumento de medição

O VIM 1996 (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia) define calibração como o "conjunto de operações que estabelece, em condições especificadas, a relação entre valores de grandezas indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição, ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os correspondentes valores realizados por padrões".

O material de referência utilizado para as medições foi um micrômetro ocular 10/100 (Figura 3.11b , 10mm divididos em 100 partes).

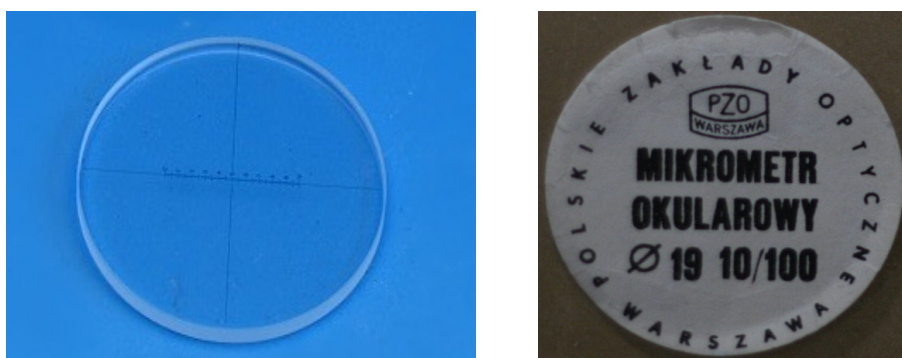


Figura 3.11: Micrômetro ocular - referência

Em cada um dos aumentos (1x, 1,5x, 2x, 3x, 4x) do estereoscópio foi capturada uma imagem para calcular o comprimento do pixel. A Figura 3.12 mostra os valores dos pixels em milímetros.

A Tabela 3.2 estabelece para cada aumento do estereoscópio a quantidade de pixels equivalente a 1 (um) milímetro nas imagens capturadas.

O micrômetro ocular resolve o problema das medidas nos eixos x e y (plano). As medidas de altura (eixo Z) foram calibradas com o auxílio de esferas. O micrômetro da Figura 3.13 com resolução de  $0,01\text{mm}$  foi o instrumento utilizado para medir o diâmetro de cada esfera.

As medidas, em milímetros, obtidas das esferas são:  $0,99\text{mm}$  /  $0,79\text{mm}$  /  $0,69\text{mm}$ .

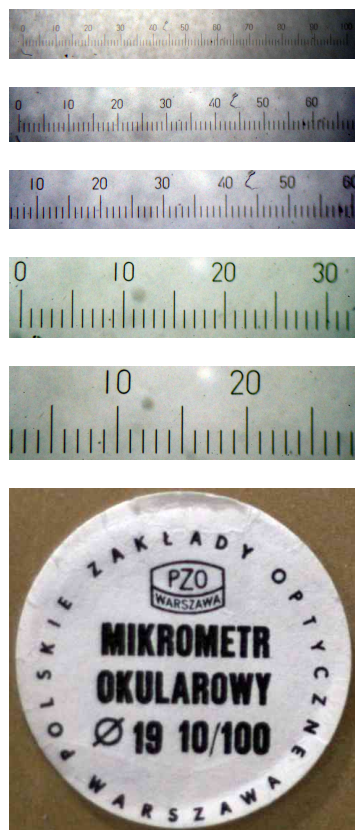


Figura 3.12: Retícula - Aumentos 1x, 1,5x, 2x, 3x, 4x

Neste momento as medidas são realizadas relacionando o foco em cada ponto da esfera. Medidas todas as alturas das esferas verificam-se as medidas expostas na Tabela 3.3

Portanto, a altura equivalente a  $1^\circ$  é de  $0,086\text{mm}$ .

Nas amostras utilizadas no trabalho - produto das peneiras 16, 30 e 40 - foram medidas as alturas médias. Em cada peneira foram medidas 20 partículas aleatoriamente para obter a estimativa da altura média.

Tabela 3.2: Quantidade de pixels por milímetro em cada aumento

Aumento	Pixels/milímetro
1x	170
1,5x	266
2x	348
3x	539
4x	713



Figura 3.13: Micrômetro

Tabela 3.3: Alturas das esferas

	Esfera 1	Esfera 2	Esfera 3
Diâmetro	0,99mm	0,79mm	0,69mm
Altura	11,5°	8°	6,5°



# Capítulo 4

## Resultados

O presente capítulo reporta os resultados experimentais obtidos na investigação de técnicas para redução do erro de predição com aproximação por esferas em medições sem contato.

A distribuição granulométrica da amostra de minério utilizada para os experimentos é apresentada na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1: Distribuição Granulométrica da Vermiculita - Peneiramento

Peneira	Abertura (mm)	Massa retida (g)
12	1,700	8,29
16	1,180	36,16
30	0,600	19,89
40	0,425	2,39
50	0,300	2,05
submesh	0,212	3,99

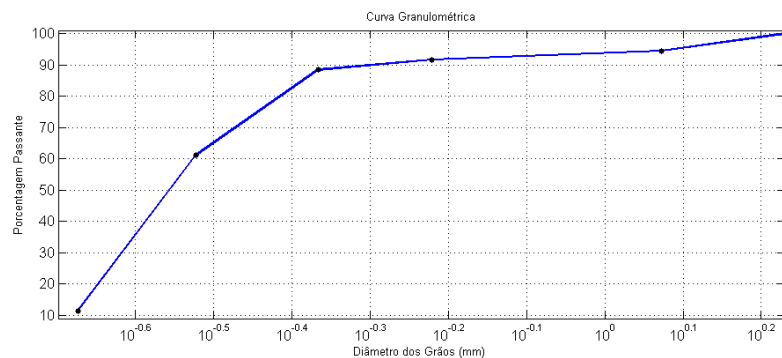


Figura 4.1: Distribuição granulométrica vermiculita

Cada uma das amostras da Figura 4.2a 4.2b 4.2c foram peneiradas computacionalmente e os resultados são apresentados nas Figuras 4.3g 4.6g 4.9h, respectivamente.



Figura 4.2: Amostras vermiculita: (a) Peneira 16 (b) Peneira 30 (c) Peneira 40

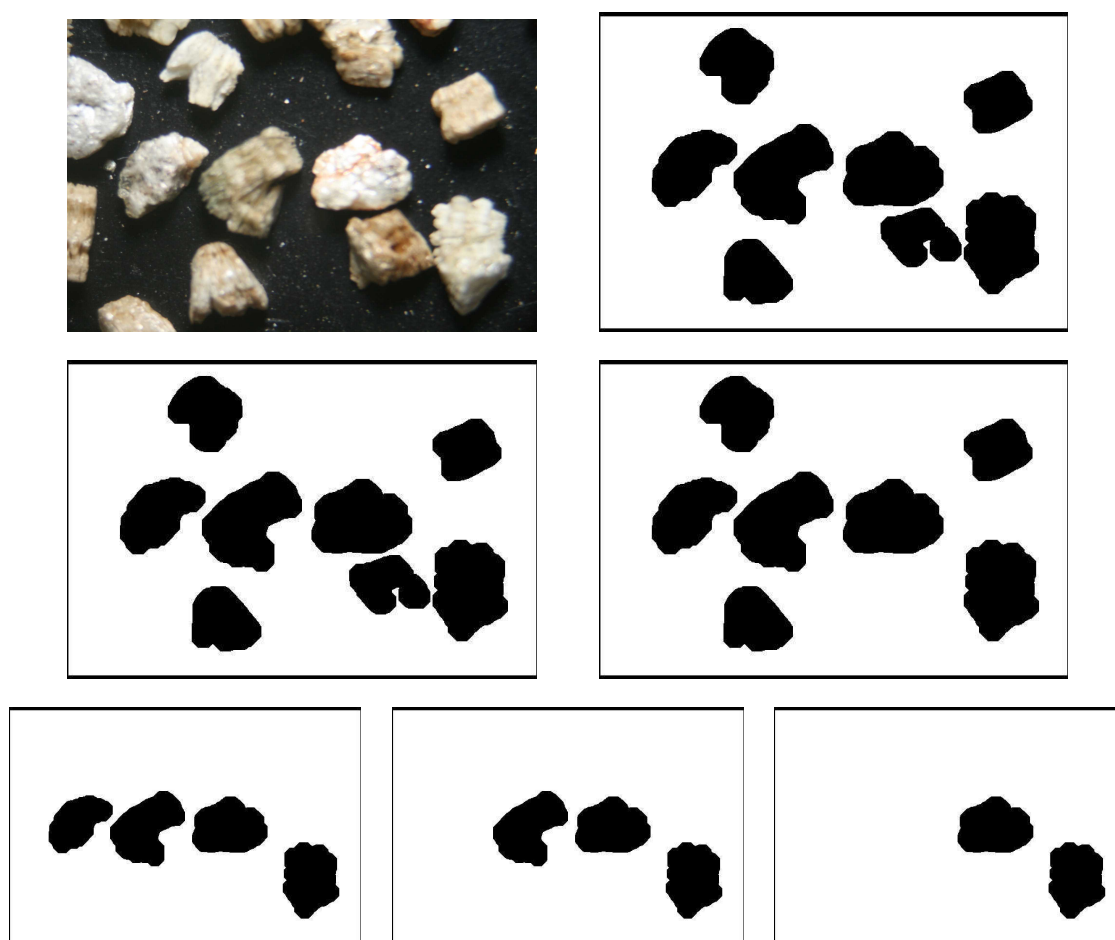


Figura 4.3: Peneiramento computacional - Material retido - (a) Amostra da Peneira 16 (b) Amostra da peneira 16 binária (c) Grãos entre  $0,71mm - 0,83mm$  (d) Grãos entre  $0,95mm - 1,19mm$  (e) Grãos até  $1,31mm$  (f) Grãos até  $1,43mm$  (g) Grãos até  $1,55mm$

As Figuras 4.4 4.5 mostram a distribuição em tamanho e a contagem computacional das partículas da Imagem 4.2a.

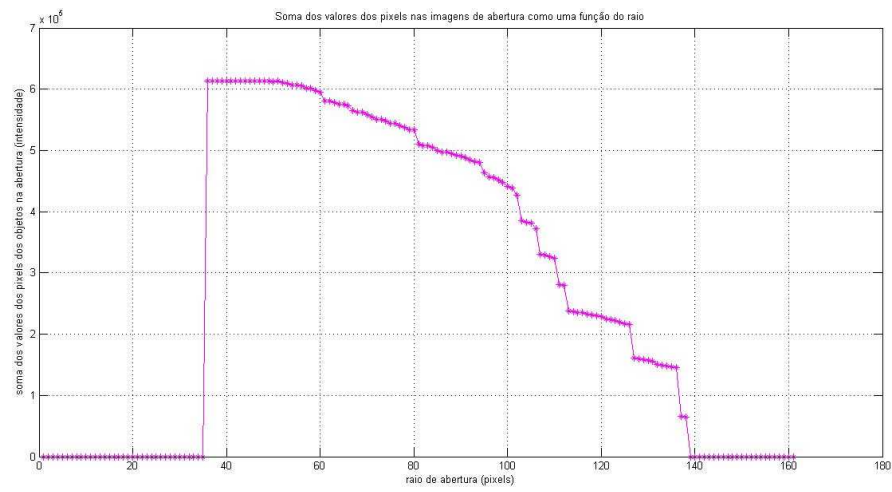


Figura 4.4: Distribuição em tamanho

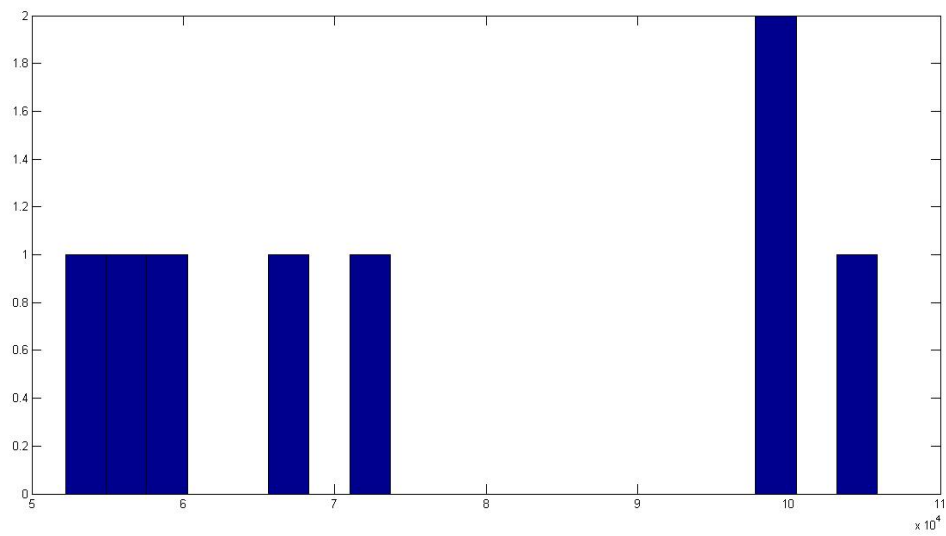


Figura 4.5: Histograma de contagem de grãos

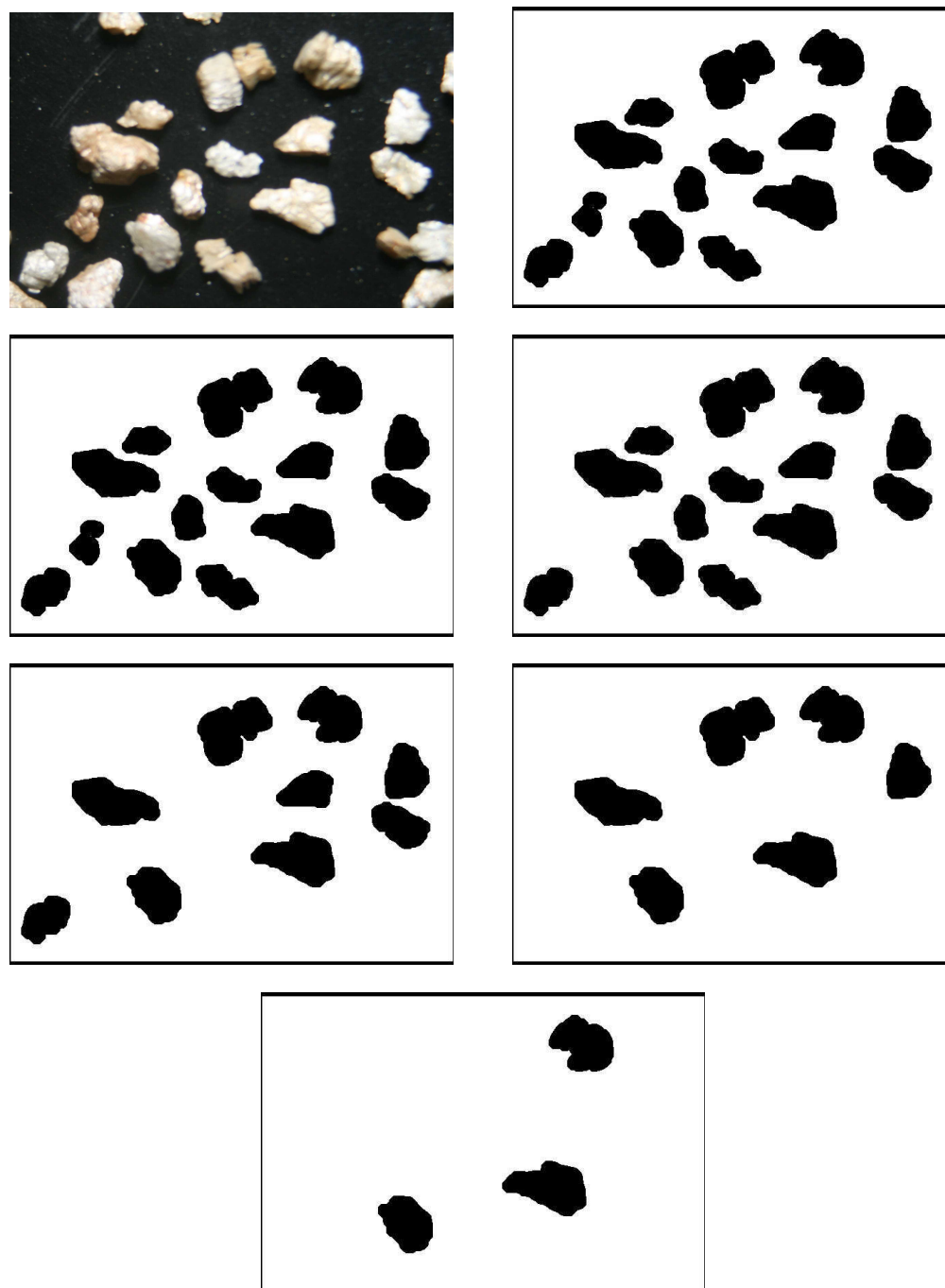


Figura 4.6: Peneiramento computacional - Material retido - (a) Amostra da Peneira 30 (b) Amostra da peneira 30 binária (c) Grãos até  $0,60\text{mm}$  (d) Grãos até  $0,71\text{mm}$  (e) Grãos até  $0,83\text{mm}$  (f) Grãos até  $0,95\text{mm}$  (g) Grãos até  $1,07\text{mm}$

As Figuras 4.7 4.8 mostram a distribuição em tamanho e a contagem computacional das partículas da Imagem 4.2b.

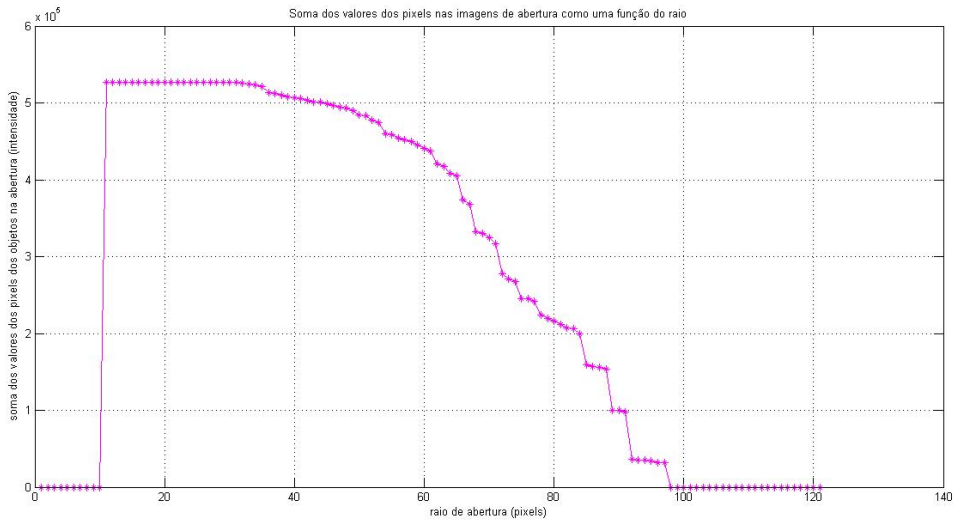


Figura 4.7: Distribuição em tamanho

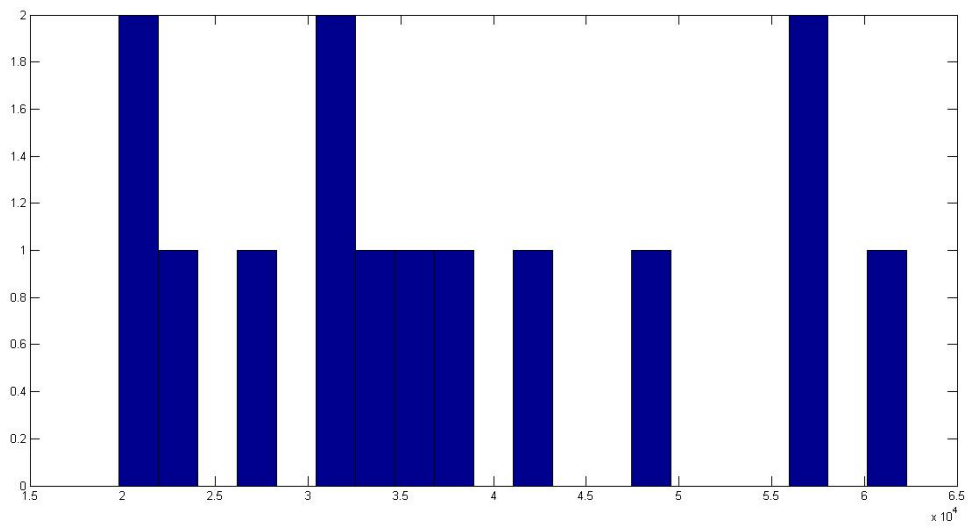


Figura 4.8: Histograma de contagem de grãos

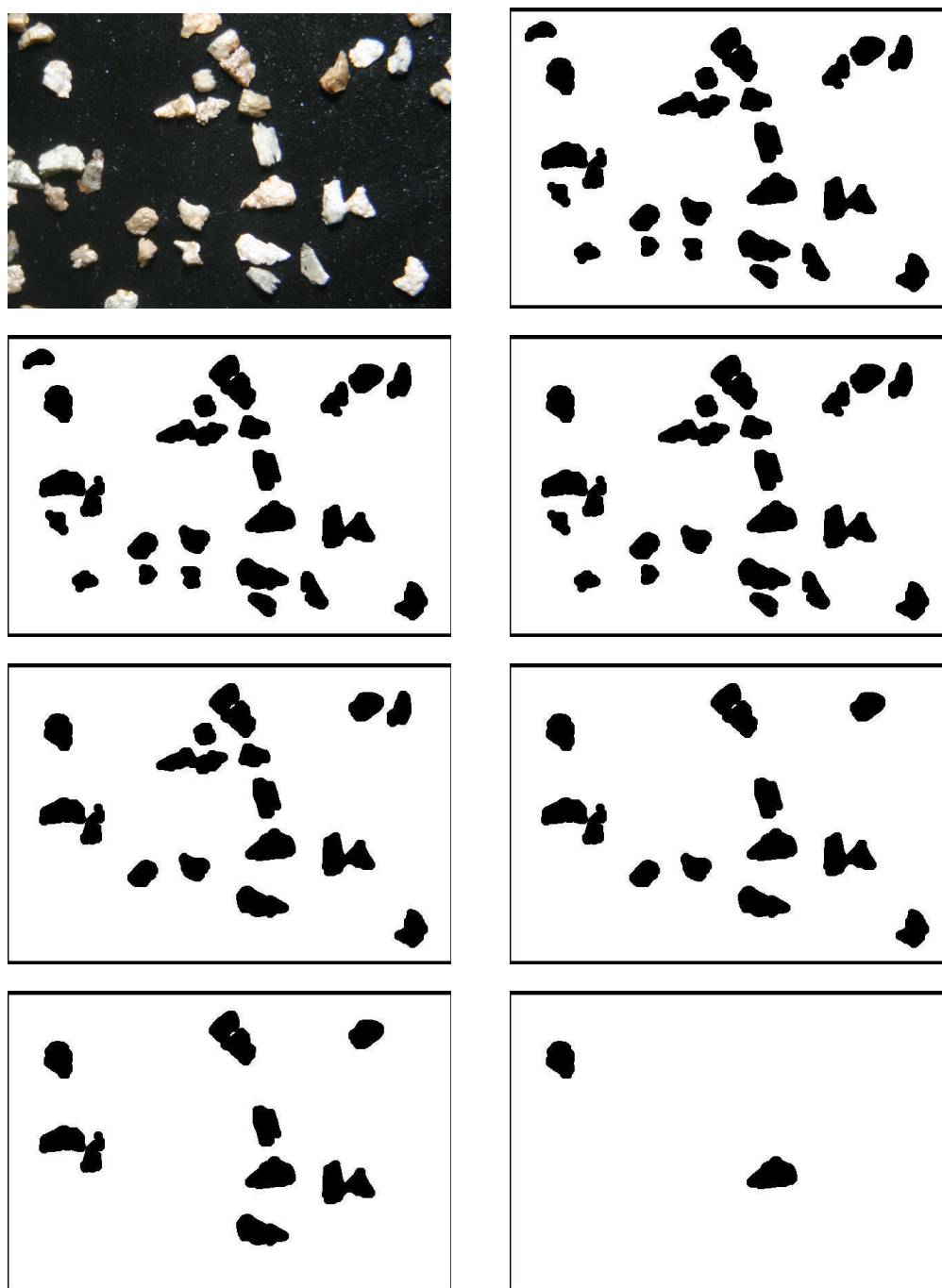


Figura 4.9: Peneiramento computacional - Material retido - (a) Amostra da peneira 40 (b) Amostra da peneira 40 binária (c) Grãos entre  $0,30mm - 0,36mm$  (d) Grãos até  $0,42mm$  (e) Grãos até  $0,42mm$  (f) Grãos até  $0,48mm$  (g) Grãos até  $0,54mm$  (h) Grãos até  $0,65mm$

As Figuras 4.10 4.11 mostram a distribuição em tamanho e a contagem computacional das partículas da Imagem 4.2c.

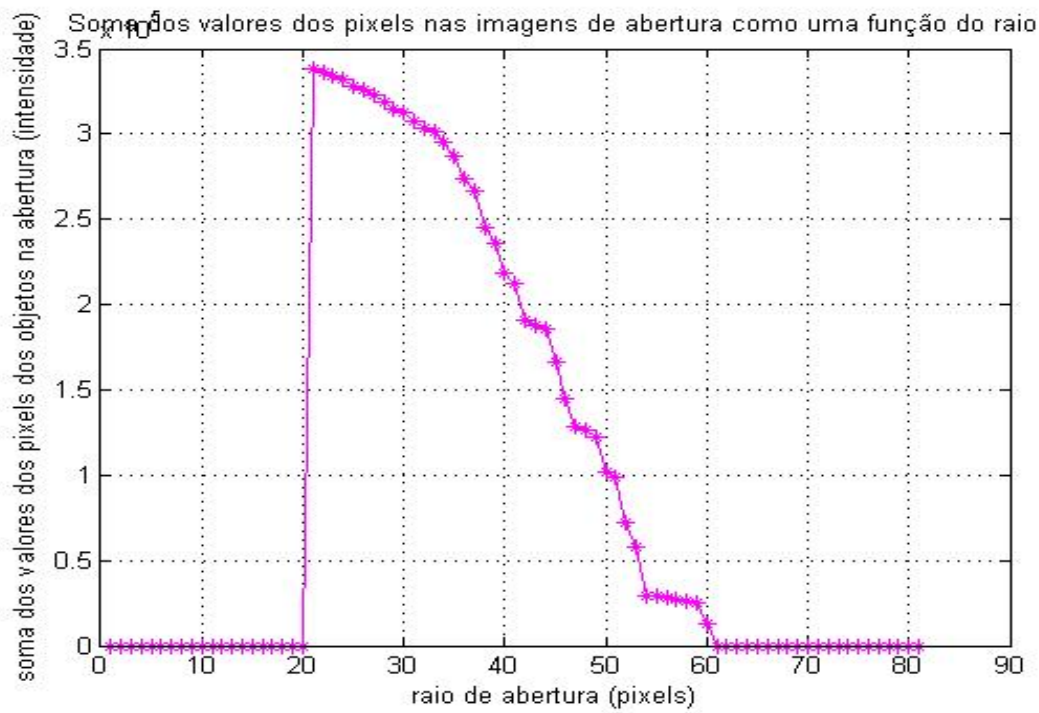


Figura 4.10: Distribuição em tamanho

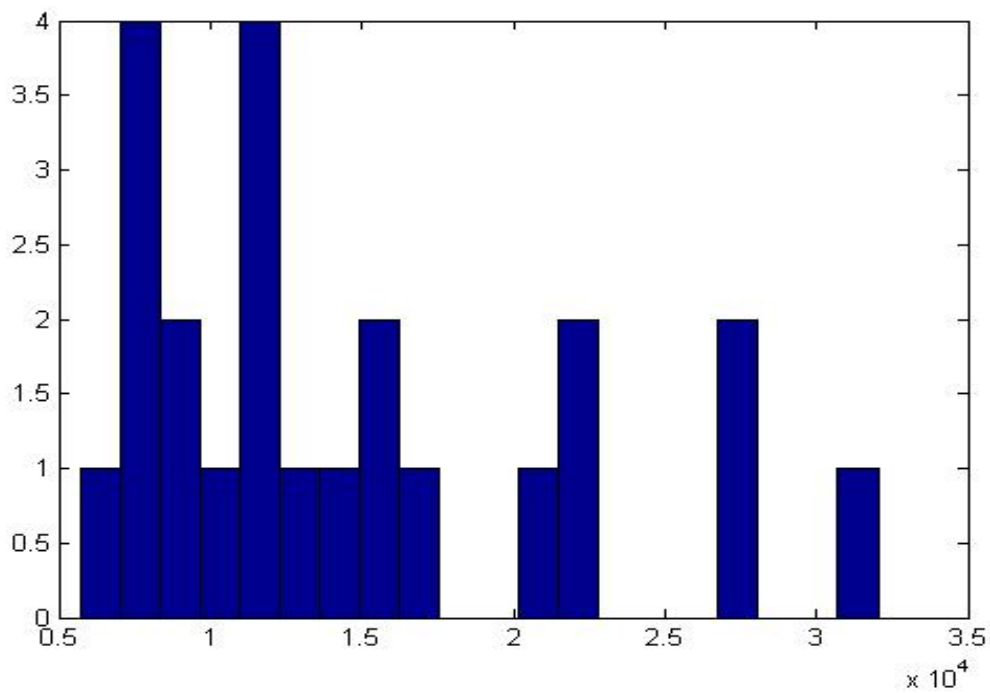


Figura 4.11: Histograma de contagem de grãos

As Figuras 4.12, 4.13j, 4.14 e 5.3 exibem o resultado de cada uma das etapas do método de reconstrução. A Figura 4.12 foi capturada com variação de foco de um em um grau. Dez imagens formam a pilha, desde a base  $i = 0$  (*background*) até o topo  $i = 9$  (região mais alta em foco). Devido a possíveis erros na captura da pilha de imagens ou ainda a imprecisões dos instrumentos foi realizada (Figura 4.13j) uma etapa de alinhamento das imagens (registro). O tempo de registro da pilha com 10 imagens foi de 6 minutos e 58 segundos. Dentre as etapas envolvidas no processamento, o alinhamento das imagens é a que consome mais tempo. Para todas as outras etapas juntas o tempo de processamento não passam dos 10 segundos. O processamento foi realizado em um computador com processador AMD E1-1200 com 2Gb de RAM utilizando windows 7.



Figura 4.12: Pilha de imagens;  $i = 0$  até  $i = 9$



Figura 4.13: Alinhamento das imagens (correção de erros na captura e colimação do estereoscópio)

As etapas subsequentes cujos resultados são apresentados nas Figuras 4.14, 5.3a e 5.3b apresentam, respectivamente, uma imagem totalmente em foco que é produto da pilha de imagens, uma imagem de índices de alturas, onde o valor de cada pixel indica a posição  $i$  da imagem da pilha que o originou e um gráfico para melhor visualização das imagens de índices uma vez que esta apresenta bastante ruído.

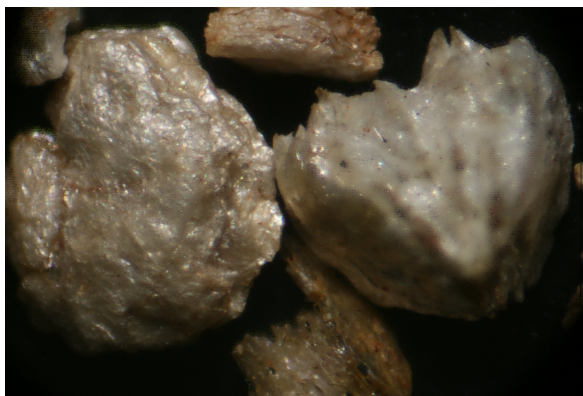


Figura 4.14: Imagem Completamente em Foco

Imagem de índices de altura na Figura 5.3a e esboço da imagem de índices exibida na Figura 5.3b;

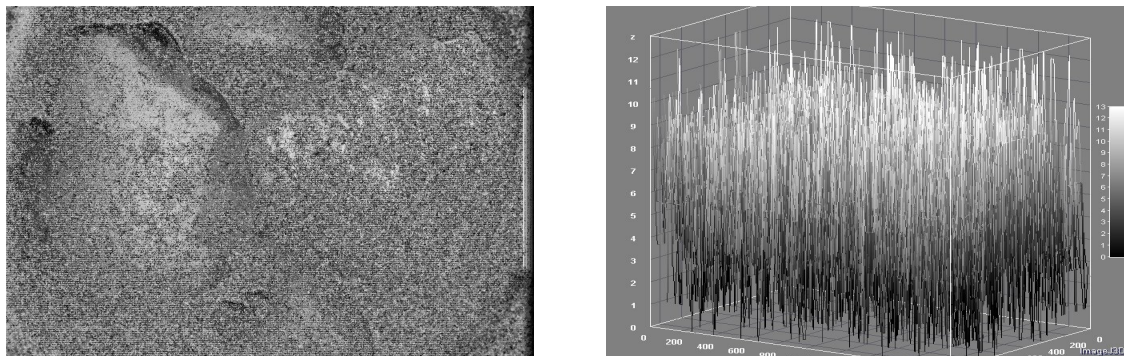


Figura 4.15: Índices de alturas

Nas Figuras 4.16, 4.17k, 4.18, 5.4a e 5.4b mais um exemplo de reconstrução:

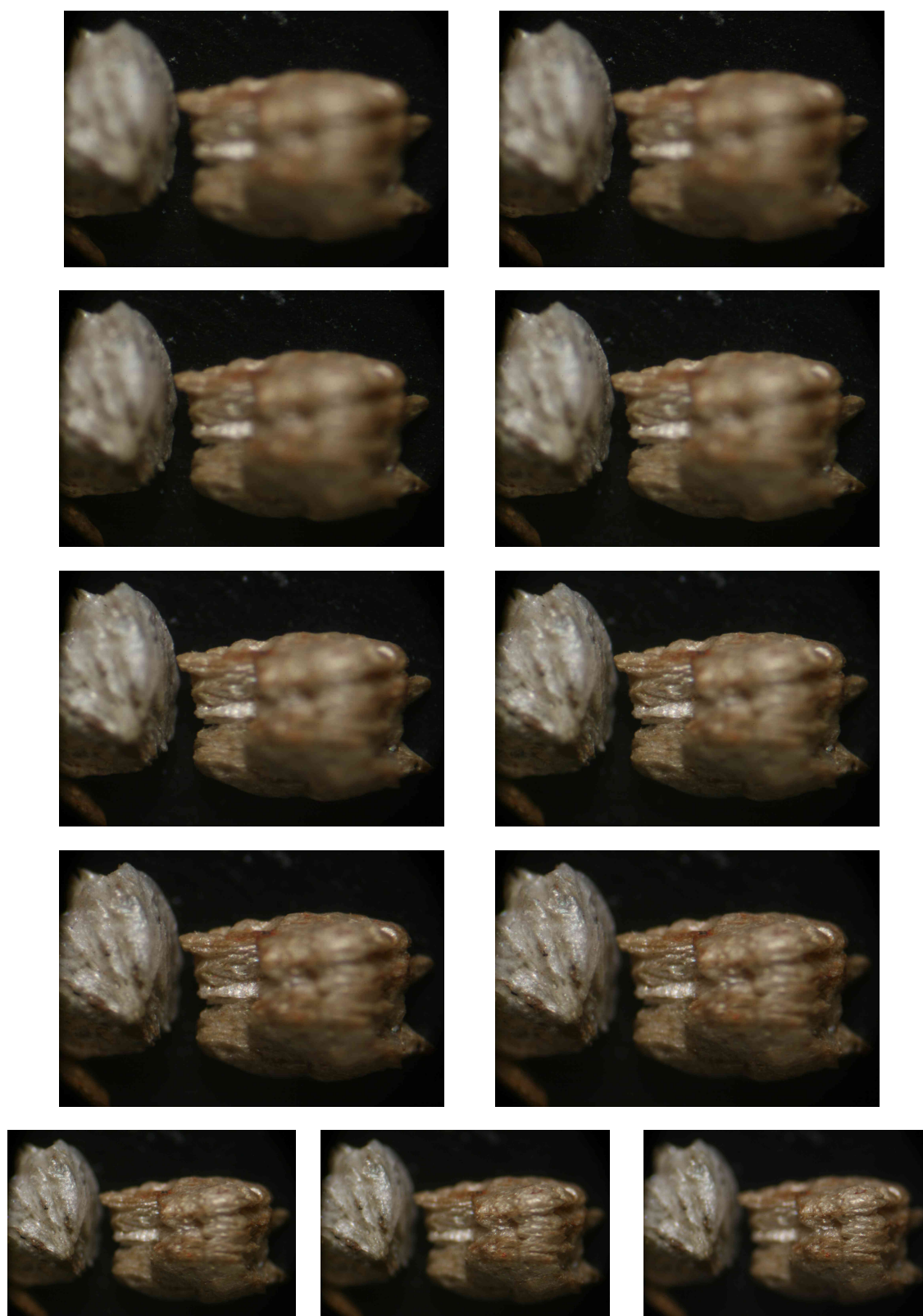


Figura 4.16: Pilha de imagens;  $i = 0$  até  $i = 10$

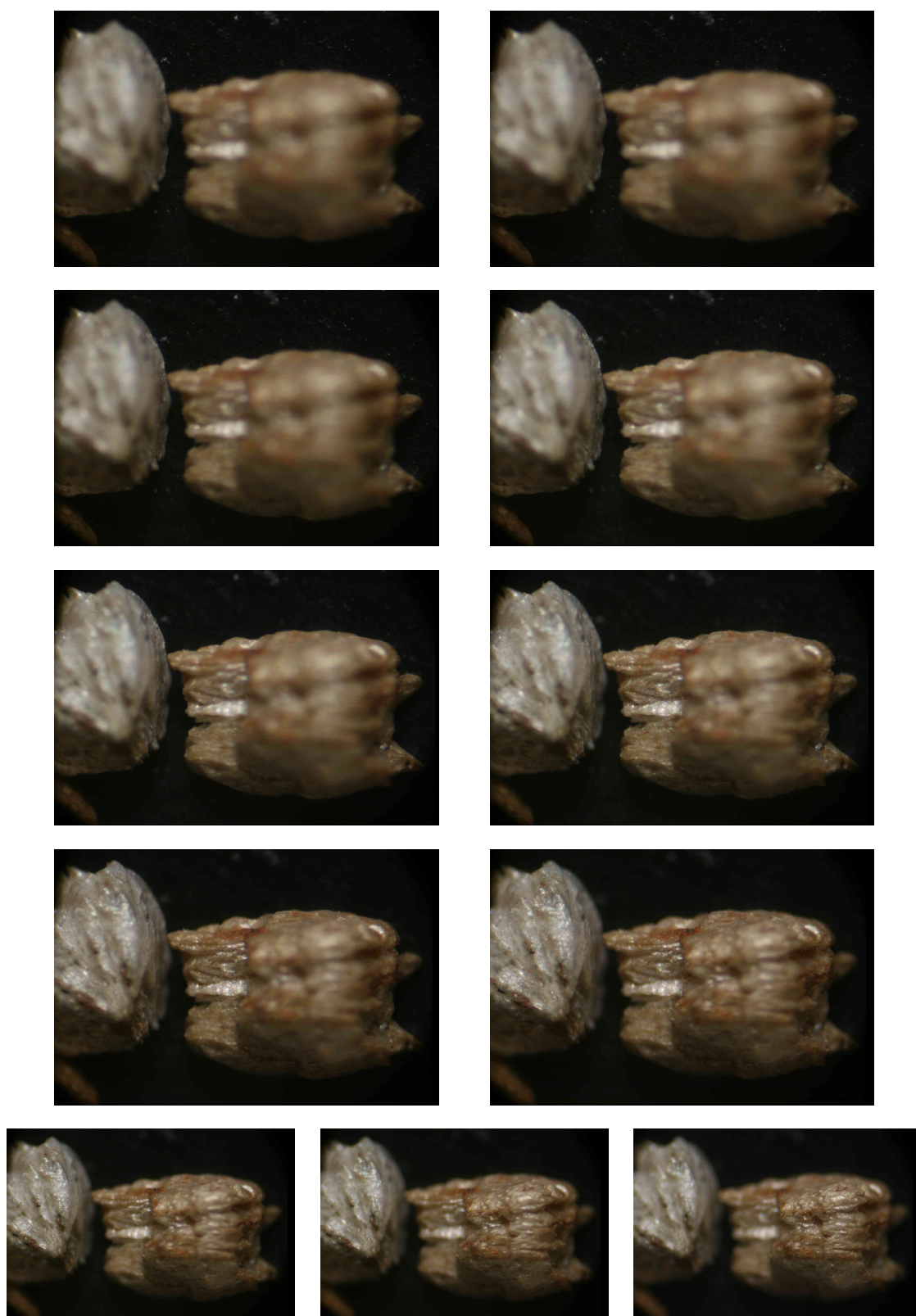


Figura 4.17: Alinhamento das imagens (correção de erros na captura e colimação do estereoscópio)

A imagem completamente em foco resultante da composição das regiões em foco da pilha de imagens é exibida na Figura 4.18;



Figura 4.18: Imagem Completamente em Foco

Imagem de índices de altura apresentada na Figura 5.4a e esboço da imagem de índices na Figura 5.4b;

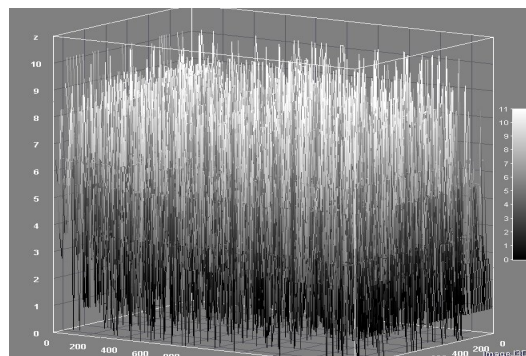
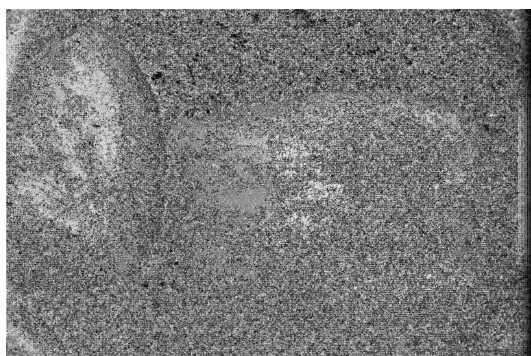


Figura 4.19: Índices de alturas

A partir da adaptação feita no microscópio foi possível medir a altura das partículas nas imagens capturadas. A variação de 1 (um) grau no aparelho equivale a  $0,086mm$ . A altura média verificada nas amostras é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Altura média

Peneira	Abertura	Altura média
16	1,18mm	1,24mm
30	0,60mm	0,68mm
40	0,42mm	0,43mm

De posse dos valores das alturas médias - Tabela 4.2 - e da distribuição granulométrica computacional dada pelas Figuras 4.3g, 4.6g e 4.9h foi possível estimar a área e o volume de cada amostra em cada uma das peneiras utilizadas.

Tabela 4.3: Medidas peneiras 16, 30 e 40

	Pen16	Pen30	Pen40
Massa (g)	36,16	19,89	2,39
r médio (mm)	0,565	0,417	0,238
h médio (mm)	1,204	0,774	0,473

Relação entre as massas do produto das peneiras utilizadas e a estimativa das áreas e volumes das amostras são exibidas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Relação entre peneiras

	mPen30/mPen16	mPen40/mPen30
Razão Massa	0,550	0,120
Razão Área	0,542	0,331
Razão Volume	0,400	0,186
Esferóide	0,296	0,200



## Discussão e Conclusões

Técnicas de controle de qualidade em inspeção de superfícies, detecção de defeitos, análise cromática e verificação de dimensões utilizando visão computacional e processamento e análise de imagens são cada vez mais requisitadas e utilizadas [Xie, 2008]. Por uma lado, a exigência do mercado por um produto com qualidade cada vez maior faz com que os processos de fabricação - industriais ou não - necessitem de inspeções de qualidade com padrões cada vez mais exatos e precisos, por outro lado estes padrões de inspeção se feitos por humanos acarretam em baixa velocidade de produção e alta exigência física e mental do avaliador [Elbehiry, H.; Hefnawy, A.; Elewa, M., 2008]. Um dos papéis da visão computacional é diminuir a subjetividade humana relativa ao processo de controle de qualidade e elevar a velocidade de produção.

Um dos problemas práticos de controle de qualidade ocorre na indústria de mineração que exige a obtenção experimental da distribuição granulométrica de partículas. Por exemplo, a classificação de partículas quanto ao tamanho pode ser feita por um aparelho chamado hidrociclone. A distribuição granulométrica empírica depende das características operacionais do hidrociclone, bem como da natureza e das condições momentâneas do material que se deseja classificar. Após a obtenção da distribuição granulométrica, é possível calcular todas as constantes necessárias à caracterização do sistema de classificação, de acordo com o modelo de Lynch-Rao. De posse das constantes, pode-se efetuar simulações computacionais do hidrociclone sob novas condições operacionais, o que viabiliza uma otimização rápida e de baixo custo.

Existem várias técnicas de análise granulométrica. A escolha da técnica adequada depende essencialmente do tamanho das partículas a serem analisadas. A granulo-

metria de partículas acima de, aproximadamente, 38 micrômetros pode ser efetuada por peneiramento. Dentre as muitas desvantagens associadas ao uso de peneiras para determinação do perfil granulométrico, pode-se citar: impossibilidade da análise de partículas abaixo de 38 micrômetros; baixa resolução do eixo de tamanhos de grãos; quanto maior o tempo de peneiramento, menor a granulometria resultante, porque as partículas tendem a se orientar pela menor dimensão e atravessar a peneira (em consequência, o tempo de peneiramento e a intensidade de vibração devem ser rigidamente controlados); uma vez que o método tende a mensurar a menor dimensão da partícula, resultados muito imprecisos podem ocorrer com matérias de partículas alongadas, como o paracetamol na indústria farmacêutica.

Dada a importância da análise granulométrica e devido aos erros inerentes ao processo de peneiramento é que no presente trabalho enfatiza-se a melhoria na exatidão no processo de granulometria. Foram investigadas três técnicas de recuperação de informação de forma *shape from stereo*, *shape from shading* e *shape from focus*.

O sistema de visão estéreo é um problema clássico de visão computacional que é baseado na tentativa de extrair formas tridimensionais de uma cena a partir de duas ou mais imagens. Alguns aspectos do método necessitam de alta exatidão e, portanto, inserem dificuldades de execução. Por exemplo, as posições da(s) câmera(s) nas aquisições das imagens devem ser conhecidas e este posicionamento deve ser bastante rigoroso para que sejam estabelecidas correspondência entre pontos das diferentes imagens capturadas. As câmeras usadas devem estar precisamente calibradas, seus parâmetros internos devem ser conhecidos e estáveis. A aquisição de material desta natureza torna este método proibitivo para este trabalho devido ao seu alto custo. Alguns fatores que tornam a correspondência de pontos difícil são as oclusões e as distorções que podem ser de natureza radiométrica ou projetiva.

Por sua vez o princípio da técnica de recuperação de informação de imagens utilizando a forma baseada na sombra é o de iluminar o objeto com diferentes fontes de luz para, a partir da sombra ou penumbra formada obter parâmetros a respeito da sua geometria - posição, altura... As diferentes posições da fonte de luz incidente sobre o objeto devem ser conhecidas e servem como uma das entradas para o sistema computacional de reconstrução de imagens. O método foi implementado, mas a falta de material adequado para iluminação das partículas tornou a técnica inviável para

o seu propósito. Outro problema enfrentado reside nas dimensões das partículas do minério utilizado uma vez que se torna difícil gerar sombra em objetos com dimensões milimétricas e até micrométricas.

A técnica de *shape from focus* foi a que se mostrou mais atraente principalmente por depender de parâmetros de funcionamento menos rígidos quando relacionados às técnicas acima citadas ao mesmo tempo que utiliza, como um dos seus pontos forte, a diminuta profundidade de campo do microscópio (o que em algumas situações seria um problema) como aliado na detecção do foco.

Todo o processo de recuperação de informações de forma é rápido (10 a 15 segundos) a menos do tempo gasto para alinhar as imagens da pilha. Em média o tempo para registro (alinhamento) de uma pilha de 10 a 12 imagens é de, em média, 7 minutos e 30 segundos. Esta é uma das etapas mais lentas do processo de reconstrução. O restante do processo (composição da imagem totalmente em foco, imagens de índices de altura e esboço da superfície) não passa dos 25 segundos de processamento. Mesmo com mais de 7 minutos para alinhar as imagens o método não se torna inviável para ser utilizado no processo de controle de qualidade, pois para a detecção de deformidades não seriam necessárias tantas imagens quanto para a reconstrução 3D.

Existem, no peneiramento físico, discrepâncias e erros pontuais no tamanho das partículas devido ao tempo de peneiramento, intensidade de agitação etc. Algumas destas discrepâncias são apresentadas nas Figuras 5.1 e 5.2



Figura 5.1: Discrepâncias no produto da peneira de abertura 0,600mm - Aumento 2x

As imagens de índices de alturas apresentadas nas Figuras 5.3a, 5.4a apresentam intenso ruído. Embora, neste caso, o ruído não interfira na informação de altura requerida é interessante investigar ferramentas para o seu abrandamento ou até a sua



Figura 5.2: Discrepâncias no produto da peneira de abertura 0,600mm - Aumento 4x  
eliminação. Uma saída imediata para melhorar a visualização foi gerar imagens que  
retratassem o valor de cada pixel como uma altura. Figuras 5.3b, 5.4b.

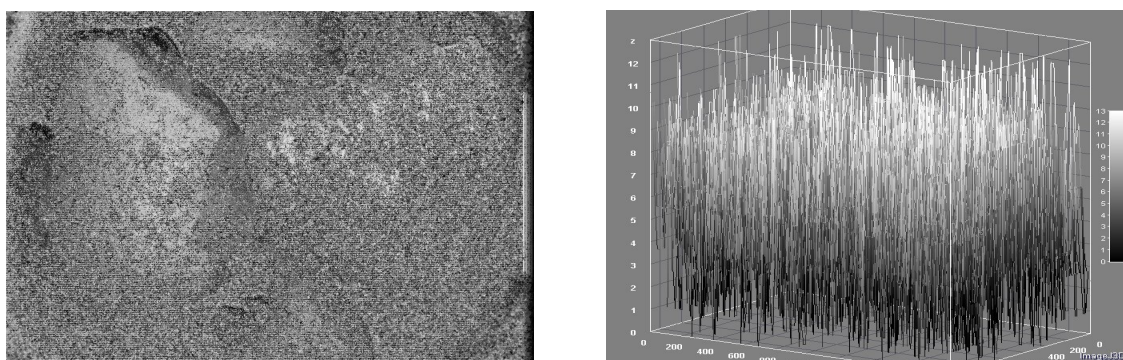


Figura 5.3: Índices de alturas

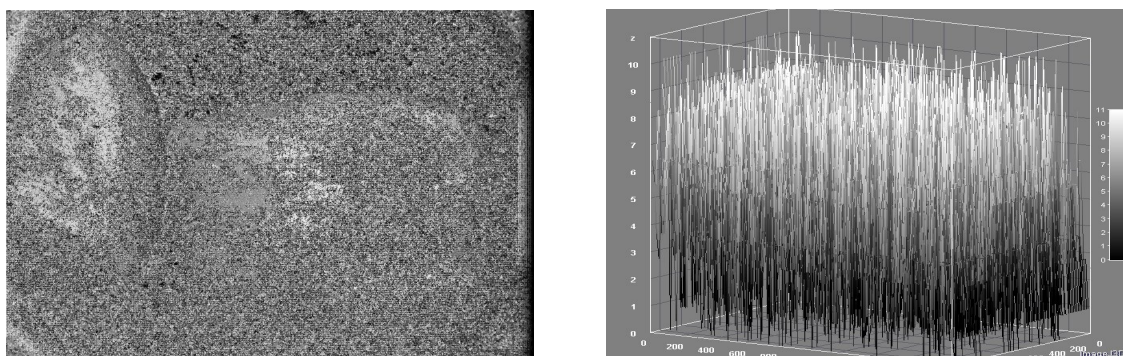


Figura 5.4: Índices de alturas

De acordo com as Tabelas 4.2 e 4.4 conclui-se que a altura das partículas não  
imprime grande influência quando se trata de estimativa de volume por aproximação  
por esferas pois os valores das alturas das partículas medidas são próximos da medida

---

do seu diâmetro. Mas devido aos erros inerentes do processo de peneiramento novas investigações devem ser realizadas com base em métodos mais exatos de distribuição granulométrica tais como os que utilizam laser. Os erros no peneiramento não invalidam o método adotado uma vez que as medidas aferidas pelo micrômetro foram validadas pelo que foi medido via câmera e microscópio. O método, por sua vez, melhora a qualidade e a exatidão do peneiramento no que se refere ao que denominou-se de peneiramento computacional, o que resulta em um peneiramento mais fino com possibilidade de "inserir" peneiras computacionais entre as aberturas das peneiras físicas o que também propicia a identificação de partículas que, por ocasião do super ou subpeneiramento, fujam da faixa de tamanho adequada como exibido nas Figuras 5.1 e 5.2.

A integração dos módulos de processamento em única linguagem é um passo que depende da construção de *plugins* para ImageJ. O bloco de processamento para peneiramento computacional está implementado em MatLab e o bloco de reconstrução 3D em ImageJ cuja implementação é em Java. As funções e pacotes pré-definidos do MatLab (*toolbox*) foram o atrativo para que uma parte do método proposto utilizasse essa plataforma para implementação, no entanto, é de interesse integrar todo o processo em ImageJ.

Automatizar o processo de medição reduzirá a subjetividade inerente à participação humana no processo. A inserção de motores de passo no instrumento de medição desenvolvido será um grande auxílio tanto na detecção automática de foco na base e no topo das partículas na pilha de imagens quanto no aumento do número de elementos em uma mesma amostra, uma vez que utilizando partículas de granulometria mais alta (acima de 1mm) com aumento acima de 40x poucos objetos são visualizados através da lente da câmera. A ideia é controlar o deslocamento da amostra nos eixos x e y para que mais elementos sejam capturados e compor as imagens parciais em uma única imagem com mais elementos amostrados.

A partir do mapa de altitudes utilizar métodos numéricos de integração para estimar o volume das partículas. De posse do mapa de altitude das partículas será feita uma investigação para estimar a forma (volume) de partículas e aproximá-las por esferóides, elipsóides ou outro modelo que seja conveniente.



# Referências Bibliográficas

- [Ahmad, 2007] Ahmad, M.B., *Focus Measure operator using 3D Gradient*. Machine Vision, 2007. ICMV 2007. International Conference on, 2007.
- [Allen, 1997] Allen, T. *Particle Size Measurement*. 5th Edition. V. 1, London: 1997.
- [Aydin e Akgul, 2008] Aydin, T., Akgul, Y. S., *A New Adaptive Focus Measure for Shape From Focus*. in BMVC08. 2008.
- [Barbosa, J.J. et al., 2011] Barbosa, J.J.; Batista L.V.; Lira, B.B.; Poel, J. v. d. *Mineral Granulometric Analysis using Mathematical Morphology*. Revista de Tecnologia da UNIFOR, Fortaleza, 2011. Submetido em 2010.
- [Barbosa, J.J. et al., 2009] Barbosa, J.J.; Batista L.V.; Lira, B.B.; Poel, J. v. d. *Optimization System for Hydrocyclones Classification and Granulometric Analysis via Mathematical Morphology*. 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Gramado - RS, 2009.
- [Barbosa, J.J., 2008] Barbosa, J.J.; *Sistema para Otimização de Classificação por Hidrociclones e análise Granulométrica utilizando Morfologia Matemática*. Dissertação de Mestrado. 2008
- [Barbosa, J.J. et al., 2007] Barbosa, J.J.; Batista L.V.; Limeira F. A.; Sousa, F. B.; Almeida, T. P.; Nóbrega F. D. *Segmentação de imagens para avaliação morfométrica do reparo ósseo após o uso de enxertos ósseos*. VII Workshop em Informática Médica - WIM, Porto de Galinhas - PE, 2007.
- [Batista et al., 2005] Batista, L. V.; Meira, M. M.; Cavalcanti Júnior, N. L.. *Texture Classification using Local and Global Histogram Equalization and the Lempel-*

- Ziv-Welch Algorithm*. 5th International Conference on Hybrid Intelligent Systems - HIS'05, Rio de Janeiro, 2005. v. 1, p. 1-6.
- [Brown, 1936] Brown, George G. *Molding Sands of Michigan and their Uses - Part I. Chemical and Physical Properties of, and Cause of Bond in Sands*. Publication 41. Geological Series 35. 1936
- [Carriso e Correia, 2004] Carriso, Regina C.C., Correia, Júlio C.G. *Comunicação Técnica elaborada para a 4a Edição do Livro de Tratamento de Minérios*. Pág. 197 a 238, CETEM; Rio de Janeiro. 2004.
- [Crompton, 2005] Crompton, C. *Particle Shape - An Important Parameter in Pharmaceutical Manufacturing*. Pharmaceutical Manufacturing and Packing Sourcer, Spring 2005 issue. Samedan Ltd., 2005
- [Dur et al., 2004] Dur, J. C.; Elsass, F.; Chaplain, V.; and Tessier, D. *The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction*. European Journal of Soil Science, Vol. 55, 2004.
- [Elbehiery, H.; Hefnawy, A.; Elewa, M., 2008] Elbehiery, H.; Hefnawy, A.; Elewa, M. *Surface Defects Detection for Ceramic Tiles Using Image Processing and Morphological Techniques* World Academy of Science, Engineering and Technology, 2005.
- [Ferreira, 2007] Ferreira, F., *Medição por contacto versus medição óptica em máquinas de medir por coordenadas (3D)*. Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (CATIM). Portugal. 2007.
- [Francus, 2005] Francus, P. (Ed.) *Image Analysis, Sediments and Paleoenvironments - Developments in Paleoenvironmental Research*, vol. 7, Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- [Gonzales e Woods, 2000] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. *Processamento de Imagens Digitais*. Ed. Edgard Blücher. 2000.
- [Gutiérrez, 1985] Gutiérrez, Leonel R. *Dimensionamiento y Optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática* Santiago Chile: Centro de Investigación Minera y Metalúrgica - CIMM, 1985.

- [Kapur et al., 1998] Kapur, P.C.; Meloy, T.P. *Spirals Observed*. Inter. J. Mineral Processing, Vol. 53, 15-28, 1998.
- [Kelly e Spottiswood, 1982] Kelly, E. G., Spottiwood, D. J. *Introduction to mineral processing*. New York: John Wiley, 1982.
- [Komuench, 2000] Kohmuench, J. N. *Improving Efficiencies in Water-Based Separators Using Mathematical Analysis Tools*. PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [Krumbein, 1941] Krumbein, W.C. *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. Journal of Sedimentology and Petroleum 11: 64-72, 1941.
- [Lambourne e Strivens, 1999] 35. Lambourne, R. and Strivens, T.A. (Eds.) *Paint and Surface Coatings - Theory and Practice*. William Andrew Publishing, 1999.
- [Lira, 1985] Lira, B. B. *Simulation of the Woodlawn Grinding Circuit* JKMRC University of Queensland. 1985.
- [Lira, 1990] Lira, B. B. *Modelos Matemáticos De Moagem: Parâmetros e Aplicação*. XIV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia, Salvador - BA, v. 1, p.546-562, 1990.
- [Lynch e Rao, 1975] Lynch, A. J. and Rao, T. C., *Modeling and Scale-Up of Hydrocyclone Classifiers*. Paper No. 9, 11th Inter. Mineral Processing Congress, Cagliari, Italy, April 21-26, 1975.
- [Nayar, 1992] Nayar, S. K., *Shape From Focus System*. Computer Vision and Pattern Recognition, 1992. Proceedings CVPR92, 1992 IEEE Computer Society Conference on, 1992.
- [Niederöst, Niederöst e Scucka, 2004] Niederöst, M.; Niederöst, J. and Scucka, J., *Shape from focus: Fully automated 3D reconstruction and visualization of microscopic objects*. Technical Sections. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zürich, 2003.
- [Pirard, 1994] Pirard, E. *Shape processing and analysis using the calypter*. Journal of Microscopy 175: 214-221, 1994.

- [Pirard, Hoyez, 1995] Pirard, E. and Hoyez, B. *A comparative study of quantitative shape analysis techniques in sedimentology*. Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H11/12: 1061-1066, 1995.
- [Shim, Malik e Choi, 2009] Shim, S.; Malik, A.S.; Choi, T-S., *Accurate Shape From Focus Based on Focus Adjustment in Optical Microscopy*. Microscopy Research and Technique. Published online in Wiley InterScience: 2009.
- [Silva et al., 2004] Silva, E. M.; Lima, J. E. F. W.; Rodrigues, L. N.; e Azevedo, J. A. *Comparação de modelos matemáticos para o traçado de curvas granulométricas*. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.39, n.4, 363-370, 2004.
- [Wojnar, 1999] Wojnar, L. *Image Analysis - Applications in Materials Engineering*. CRC Press, 1999.
- [Xie, 2008] Xie, X. *A Review of Recent Advances in Surface Defect Detection using Texture analysis Techniques*. Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis 7(3):1-22, 2008.

# Capítulo 6

## Apêndice

### 6.1 Apêndice A

Para comparação e validação dos resultados obtidos neste trabalho utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura MEV do laboratório de materiais da UFPB.

Os experimentos promoveram medidas para comparação com o método utilizado de acordo com a Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Validação do Instrumento de medição

Partículas	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Medida MEV	0,612	1,224	1,077	1,083	1,824	1,475	0,728	2,448
Instrumento	0,603	1,206	1,085	1,146	1,809	1,387	0,754	2,412
Erro Relativo	-1%	-1%	1%	6%	-1%	-6%	4%	-1%

Algumas das imagens obtidas são exibidas na Figura 6.1e.

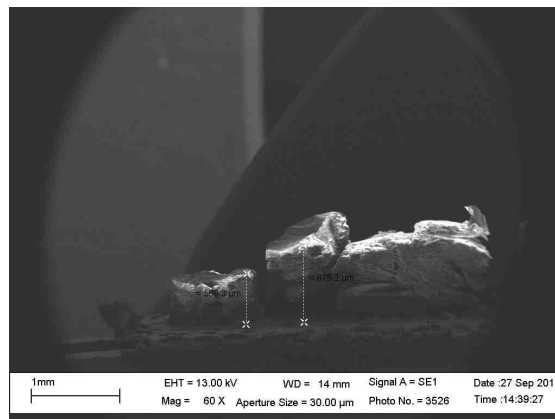
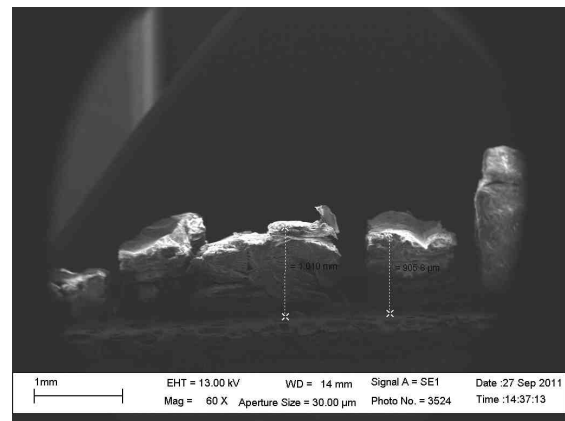
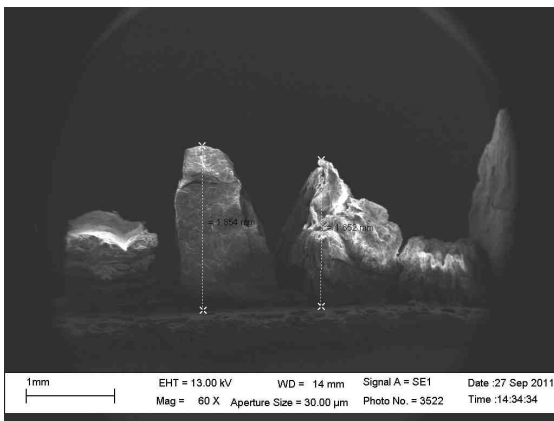
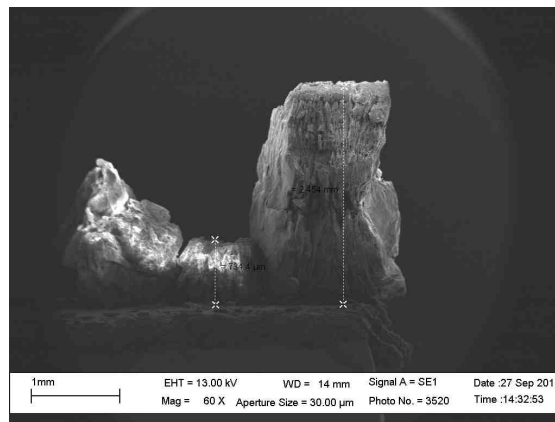


Figura 6.1: Imagens MEV e Instrumento

## 6.2 Apêndice B

Módulo de processamento I - Matlab

Neste módulo as imagens capturadas são submetidas ao processo de peneiramento computacional. A simulação promove a inserção de peneiras computacionais entre os intervalos de aberturas das peneiras físicas.

```
%Granulometry

clear all
close all
%Busca e Leitura da Imagem
[FileName, PathName] = uigetfile({'*.tif'; '*.bmp'; '*.jpg'; '*.*'},
'Select the image file');
[pathstr, name, ext, versn] = fileparts([PathName FileName]);
[token, rem] = strtok(ext, '.');
I = imread(fullfile(PathName, FileName), token);
figure(1), imshow(Irgb), title('')
I = rgb2gray(I);
I = im2bw(Irgb, level);
I = Irgb;

%Realce do contraste (Enhance constrast)
claheI = adapthisteq(I, 'NumTiles', [10 10]);
claheI = imadjust(claheI);
level = graythresh(claheI);
claheI = im2bw(claheI, level);
figure, imshow(claheI)
claheI = imopen(claheI, strel('disk', 8));
claheI = imclearborder(claheI);
clear I
claheI = imsubtract(I, Iopen);
figure, imshow(claheI)
imshow(claheI)
figure, imshow(claheI);

% Peneiramento (Sifting - collecting what remains after each pass)
for counter = 8:35
    remain = imopen(claheI, strel('disk', counter));
```

```

        intensity_area(counter + 1) = sum(remain(:));
    end
    figure,plot(intensity_area, 'm - *'), grid on;
    title('Sum of pixel values in opened image as a function of radius');
    xlabel('radius of opening (pixels)');
    ylabel('pixel value sum of opened objects (intensity)');

    %First derivative
    intensity_area_prime = diff(intensity_area);
    figure, plot(intensity_area_prime, 'm - *'), grid on;
    title('Granulometry (Size Distribution) of Snowflakes');
    set(gca, 'xtick', [0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22]);
    xlabel('radius of snowflakes (pixels)');
    ylabel('Sum of pixel values in snowflakes as a function of radius');

    dim = 2;
    dim = 6;
    rad = zeros(1802, 2003, dim);
    rad = zeros(1299, 1984, dim);
    rad = zeros(405,645,dim);
    rad = zeros(594,392,dim);
    Extrating elements with especific radius
    for i = 1:21

    for i = 19:25
        open(:,:,i) = imopen(claheI, strel('disk', i));
        %figure, imshow(open(:,:,i), []);
        open(:,:,i+1) = imopen(claheI, strel('disk', i+1));
        rad(:,:,i) = imsubtract(open(:,:,i), open(:,:,i+1));
        figure, imshow(rad(:,:,i), []);
    end

    Módulo de processamento II - ImageJ

    Neste módulo ocorre o processo de reconstrução, desde o alinhamento das imagens
    até a image de índices de alturas.

    import java.awt.image.BufferedImage;

```

```
import java.awt.image.WritableRaster;

/**
 * O fluxo do programa funciona da seguinte maneira:

 1 - FOCUS(): método principal que realiza as operações e compõe
 a imagem em foco
 2 - BORDAS(): calcula o gradiente para uma imagem e armazena
 o valor e índice do gradiente mais significativo para as
 coordenadas da imagem
 3 - MEDIANAADAPTATIVA(): calcula uma mediana adaptativa, que
 opera sobre tamanhos de vizinhanças diferentes, dependendo da
 magnitude dos valores de detalhamento de borda de cada ponto

 * @author Anderson e Eduardo
 */
public class Focus3D {

    /* Implementação do algoritmo de ordenação Quicksort */
    static void quickSort(int[] v, int min, int max) {
        int down = min;
        int up = max;
        int pivot = v[min];
        int aux;

        while(down < up) {
            while(v[down] < pivot)
                down++;

            while(v[up] > pivot)
                up--;

            if(down <= up) {
                aux = v[down];
                v[down] = v[up];
                v[up] = aux;

                down++;
            }
        }
    }
}
```

```
        up--;
    }
}

if(up > min)
    quickSort(v, min, up);

if(down < max)
    quickSort(v, down, max);
}

/* Implementação do brilho multiplicativo em imagem RGB */
static void brilhoMultiplicativo(WritableRaster image, int valor){
    int width = image.getWidth();
    int height = image.getHeight();
    double[] rgb = new double[3];

    for(int i = 0 ; i < width; i++) {
        for(int j = 0 ; j < height; j++) {
            image.getPixel(i, j, rgb);

            rgb[0] *= valor;
            rgb[1] *= valor;
            rgb[2] *= valor;

            for(int n = 0 ; n < 3 ; n++) {
                if(rgb[n] > 255) rgb[n] = 255;
                else if (rgb[n] < 0) rgb[n] = 0;
            }

            image.setPixel(i, j, rgb);
        }
    }
}

/** Implementação de uma mediana adaptativa.
```

É importante destacar que este filtro de mediana opera sobre tamanhos de vizinhanças diferentes, dependendo da magnitude dos valores de

detalhamento de borda de cada ponto, de acordo com a equação:

```
raio = round( media/intensidade(i,j)).
```

Analisando a equação, percebe-se que quanto maior for a intensidade de borda no ponto (i, j) - intensidade(i,j) - menor será a vizinhança; e quanto menor a intensidade maior o tamanho da vizinhança, ou seja, se um determinado pixel tem um valor de intensidade de gradiente muito alto a probabilidade de que ele seja o pixel correto é muito grande. Por outro lado, se o valor de intensidade de borda for pequeno é provável que ele não seja o pixel correto - ruído - e, assim, esse pixel deve ser trocado pela mediana dos pixels ao seu redor para que haja uma uniformização da matriz de índices.

```
@param intensidade
@param indices
**/
static void medianaAdaptativa(double[][] intensidade, int[][] indices){
    int width = indices.length;
    int height = indices[0].length;
    int raio;
    double media = 0;
//    double max = 0;

    int copia[][] = new int[width][height];

    //Cópia da matriz
    for(int i = 0 ; i < width; i++) {
        for(int j = 0 ; j < height; j++) {
//            if(intensidade[i][j] > max)
//                max = intensidade[i][j];
            media += intensidade[i][j];
            copia[i][j] = indices[i][j];
        }
    }

    media = media / (width*height);
//    System.out.println(media);
```

```

//Varredura da imagem
for(int i = 0 ; i < width; i++) {
    for(int j = 0 ; j < height; j++) {
        /*if(intensidade[i][j] < 30)
            raio = (int)(30 - intensidade[i][j])/3 + 1;
//raio = (int)Math.round(
(intensidade[i][j]*intensidade[i][j])/100 + 11 );
        else
            raio = 1;*/

//      System.out.println("media = " + media + " / intensidade =
" + intensidade[i][j] + " / raio = " + Math.round(media / intensidade[i][j]));
            if(intensidade[i][j] < 1)
                raio = (int)Math.round(media);
            else
                raio = (int)Math.round(media / intensidade[i][j]);

            int x1 = i - raio < 0 ? 0 : i - raio;
            int x2 = i + raio > width - 1 ? width - 1 : i + raio;
            int y1 = j - raio < 0 ? 0 : j - raio;
            int y2 = j + raio > height - 1 ? height - 1 : j + raio;

//Número de pixels que formam a area de aplicação do filtro
            int size = (x2 - x1 + 1) * (y2 - y1 + 1);

            int v[] = new int[size];

//Preenchimento do vetor
            for(int m = x1, cont = 0; m <= x2; m++) {
                for(int n = y1; n <= y2; n++, cont++) {
                    v[cont] = copia[m][n];
                }
            }

            quickSort(v, 0, size - 1);

//Atribuição do valor central do vetor ao índice
            if(size%2 == 1)
                indices[i][j] = v[(size-1) / 2];

```

```
        else
            indices[i][j] = (int)Math.round((v[size/2] + v[size/2 - 1]) / 2.0);
        }
    }

}

/**
 * Implementação de algoritmo de gradiente por convolução.
 * Utiliza a mascara de convolução (-1,-1,-1;-1,8,-1;-1,-1,-1).
 *
 * @param raster imagem de entrada sobre a qual sera aplicada
 * a mascara de convolução para calculo do gradiente
 * @param intensidade matriz que armazena os valores de gradiente
 * mais significativos
 * @param indices matriz que armazena os indices - referentes a
 * pilha de imagens com diferentes profundidades de foco - com os
 * valores de gradiente mais significativos
 * @param f índice da imagem de entrada (param raster) na pilha de imagens
 */
public static void bordas(WritableRaster raster, double[][]
intensidade, int[][] indices, int f) {
    int width = raster.getWidth();
    int height = raster.getHeight();

    double rgb[] = new double[3];
    double I[][] = new double[width][height];

    //Matriz de convolução
    int conv[][] = { { -1, -1, -1},
                    { -1,  8, -1},
                    { -1, -1, -1} };

    //Preenchimento do canal de intensidade
    //A imagem de entrada eh do tipo RGB, portanto eh feita uma
    conversão para apenas uma única banda
    for(int i = 0; i < width; i++) {
        for(int j = 0; j < height; j++) {
            raster.getPixel(i, j, rgb);
```

```

//          System.out.println("R = " + rgb[0] + " /
G = " + rgb[1] + " / B = " + rgb[2]);
        I[i][j] = (rgb[0] + rgb[1] + rgb[2]) / 3;
        // conversão RGB -> Monocromática
    }
}

//Convolução da imagem de entrada com a mascara de convolução
for(int i = 0; i < width; i++) { // Percorre colunas e
linhas da imagem de entrada
    for(int j = 0; j < height; j++) {
        double somatório = 0;

for(int m = 0; m < 3; m++) { //Percorre a máscara
de convolução
    for(int n = 0; n < 3; n++) {
        if(i + m >= 1 && i + m - 1 < width &&
j + n >= 1 && j + n - 1 < height) {

            somatório += conv[m][n] * I[i + m - 1][j + n - 1];
        }
    }
}

        somatório = Math.abs(somatório); // valor absoluto do
gradiente para todas as coordenadas, pois interessa
apenas a intensidade do gradiente

//0 valor do gradiente para a coordenada calculada acima
sera armazenado somente se este valor for estritamente maior
//que o valor contido na mesma coordenada da matriz < intensidade >.
Assim, guardamos apenas o valor de gradiente mais significativo.
//0 índice do gradiente mais significativo também eh armazenado
- na matriz < indices >.
        if(somatório > intensidade[i][j]) {
            intensidade[i][j] = somatório;
            indices[i][j] = f;
        }
    }
}
}

```

```
    }

    /* Implementação do algoritmo de composição em foco */
    public static BufferedImage focus(WritableRaster raster,
        WritableRaster[] arquivos) throws Exception {
        int width = raster.getWidth(); // largura da imagem
        int height = raster.getHeight(); // altura da imagem

        int rgb[] = new int[3];

        double intensidade[][] = new double[width][height];
        int indices[][] = new int[width][height];

        /* Para cada imagem na pilha de imagens, calcule o gradiente
        e armazene os gradientes mais significativos e seus índices.
        Ao final temos a matriz < intensidade >, que armazena os gradientes
        mais significativos; e, temos a matriz < indices >, que armazena em cada
        coordenadas índice na pilha de imagens que teve o gradiente mais significativo,
        ou seja, a imagem que esta "mais em foco" naquela coordenada.
        */
        for(int n = 0; n < arquivos.length - 1; n++) {
            WritableRaster raster2 = arquivos[n];
            bordas(raster2, intensidade, indices, n);
        }

        //Suavização dos índices de maneira adaptativa afim de diminuir
        o ruído medianaAdaptativa(intensidade, indices);

        //Composição em foco
    }

    /*
    O passo seguinte verifica a matriz de índices e gera uma imagem onde
    o valor de cada pixel é obtido através dos índices.
    Por exemplo, se o valor de coordenadas (0,0) da matriz de índices é
    igual a 10, o valor do pixel, de mesma coordenada, da imagem resultante,
    corresponde ao valor do pixel nesta mesma coordenada da imagem de índice 10,
    dentre as imagens contidas na pilha de imagens inicial.
    A imagem obtida por este último passo trata-se da imagem com foco máximo.
    */
    for(int n = 0; n < arquivos.length - 1; n++) { //Para cada imagem
```

```

na pilha...
    WritableRaster raster2 = arquivos[n];

for(int i = 0; i < width; i++) { //Percorra linhas e colunas...
    for(int j = 0; j < height; j++) {
        if(indices[i][j] == n) { //Se a coordenada atual eh uma coordenada
            que contem o gradiente mais significativo (ou seja, se o índice e
            a posição na pilha da imagem atual)...
            raster2.getPixel(i, j, rgb); //Obtenha a valor do pixel original
            (que esta em foco)...
            //rgb[0]=rgb[1]=rgb[2]=n*6;
            raster.setPixel(i, j, rgb); //E preencha a coordenada da imagem
            "completamente em foco" com o valor obtido.
//            System.out.println("R = " + rgb[0] + " /
G = " + rgb[1] + " / B = " + rgb[2]);
                }
            }
        }
    }

//Cria uma imagem com os valores da matriz dos indices com os valores
de gradiente mais significativos
    BufferedImage index = new BufferedImage(width, height,
    BufferedImage.TYPE_USHORT_GRAY);
    for(int i = 0; i < width; i++) {
        for(int j = 0; j < height; j++) {
            index.setRGB(i, j, indices[i][j]);
        }
    }

    return index;
}
}

```