

## 3 Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta as etapas experimentais e os materiais usados neste trabalho, assim como os equipamentos e as técnicas envolvidas no mesmo.

### 3.1 Seleção e Preparação de Amostras

Para a realização deste trabalho, a Vale forneceu amostras de minério de ferro ao DEMa. Estas amostras foram obtidas de finos de minérios de ferro (*sinter feed*) provenientes de minas da Vale. Estes finos de minérios foram classificados em séries de peneiras e utilizados para criar as amostras segundo a faixa granulométrica.

A confecção das seções polidas seguiu o procedimento rotineiro adotado no Setor de Caracterização Tecnológica (SCT) do CETEM/MCTI. Primeiramente, preparou-se a resina onde, para cada 1 g de resina utilizou-se 0,12 g de catalisador. A resina foi vertida dentro dos moldes com as frações de minério de ferro, preenchendo, deste modo, os espaços vazios entre as partículas de minério que conformam as seções. As seções prontas foram deixadas a temperatura ambiente até a cura (2 a 3 dias, aproximadamente).

Após a cura, as seções foram retiradas dos moldes para serem desbastadas e polidas através de um procedimento convencional. Este procedimento foi realizado numa politriz automática (sistema Struers TegraPol-15) do SCT do CETEM/MCTI.

O processo de desbaste das seções foi iniciado com disco metálico com partículas de diamante de 70  $\mu\text{m}$  passando, em seguida, pelos de granulação 40, 15, 9 e 6  $\mu\text{m}$ . Este desbaste foi realizado com água durante 2 min, nas três primeiras granulações, e durante 4 min, nas duas últimas.

Quando terminado o processo de desbaste, as seções foram levadas ao banho ultrassônico para eliminar resíduos, evitando deste modo arranhá-las durante o polimento. O processo de polimento foi realizado com suspensões diamantadas, passando pelos panos 3 e 1  $\mu\text{m}$  durante 1 h, respectivamente. Deste modo, foram obtidas seções polidas de minério de ferro com diâmetro de 30 mm.

É bom salientar aqui que a etapa de preparação de amostras é crítica para uma boa identificação dos cristais de hematita.[65] Assim, pode-se afirmar que esta etapa é um dos pilares do presente estudo por ser condição necessária para obter imagens com qualidade no MLR.

### 3.2

#### Aquisição de Imagens ao Microscópio Ótico

Como nenhum dos dois microscópios existentes no LMD do DEMa/PUC-Rio está equipado com polarização circular, foi utilizado o microscópio do SCT do CETEM/MCTI para capturar as imagens deste trabalho. Este microscópio é um Zeiss AxioImager.M2m com câmera digital Zeiss AxioCam MRc5 de resolução máxima 2584 X 1936 pixel. O mesmo é controlado através do software AxioVision 4.8.2.[48]

Todas as imagens foram obtidas com a lente objetiva de 20X (EC Epiplan 20X/0, 40 HD M27) no modo RGB, com uma quantização de 24 bit e resolução 1292 X 968 pixel. As rotinas de PADI foram desenvolvidas nos softwares AxioVision 4.8.2, FIJI 1.45b e Matlab R2010b.[48, 88, 114]

Antes de iniciar a aquisição de imagem, com o intuito de garantir a reprodutibilidade do experimento, foram devidamente registradas as condições iniciais de trabalho no microscópio:

- ▷ Para corrigir o fundo foi usado um padrão de refletância de carbetto de silício (SiC), gerando uma imagem de fundo para a lente objetiva de 20X. Esta imagem de fundo é utilizada em um procedimento automático de correção de fundo.
- ▷ No caso particular da captura de imagens com polarização circular (CPOL), há um gradiente de iluminação na imagem gerado pelo sistema de polarização. Este gradiente de iluminação é eliminado automaticamente com a correção de fundo. O mesmo padrão de refletância de SiC é utilizado para gerar a imagem de fundo com CPOL no pré-processamento (Seção 3.3.1).
- ▷ A iluminação foi mantida constante pelo controle digital direto da tensão da lâmpada.
- ▷ A configuração dos filtros e prismas também foi mantida constante pelo controle digital do microscópio.
- ▷ A sensibilidade da câmera, a exposição e o ajuste de branco foram inicialmente otimizados para uma imagem representativa de cada amostra e foram mantidos constantes para a captura dos campos subsequentes.

- ▷ A combinação da lente objetiva de 20X com a resolução acima citada da câmera gerou uma resolução de  $0,53 \mu\text{m}/\text{pixel}$ . Evitou-se trabalhar com maiores aumentos, apesar de fornecerem melhor resolução, devido à limitada área do campo, e menor profundidade de foco, o que prejudicaria o processo de captura automática de imagens.

Durante o desenvolvimento metodológico os campos foram escolhidos para obtenção de imagens com hematita compacta (lobular, lamelar e granular). Nesta etapa, a hematita porosa (martita e microcristalina) foi eliminada manualmente das imagens. As demais fases foram eliminadas com a segmentação da imagem sem polarização (SP). Assim, quatro imagens de um mesmo campo são obtidas:

- (i) Imagem RGB de 24 bit SP (Figura 3.1a);
- (ii) Imagem RGB de 24 bit linearmente polarizada (LPOL) com polarizadores semi-cruzados a partir do ponto de extinção (Nicois Cruzados) girados  $+10^\circ$  (Figura 3.1b);
- (iii) Imagem RGB de 24 bit LPOL com o polarizador girados  $-10^\circ$  (Figura 3.1c) e;
- (iv) Imagem RGB de 24 bit CPOL (Figura 3.1d).

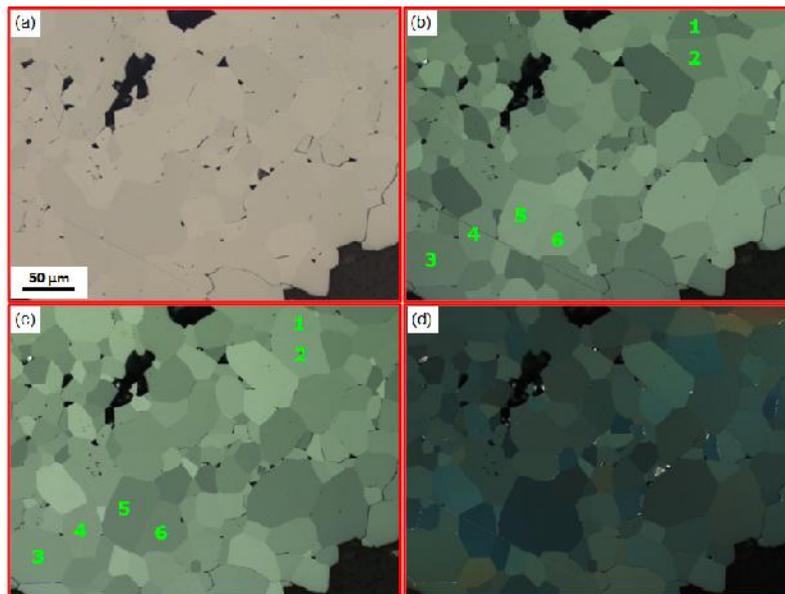


Figura 3.1: Três imagens de um mesmo campo: (a) Imagem SP; (b) Imagem LPOL com polarizador girado  $+10^\circ$ ; (c) Imagem LPOL com polarizador girado  $-10^\circ$  e; (d) Imagem CPOL.

Mesmo com o aumento de contraste entre a maioria dos cristais das imagens LPOL, existem ângulos de polarização onde cristais adjacentes apresentam baixo contraste entre eles. Portanto, é necessário utilizar uma segunda imagem polarizada para aumentar a discriminação dos cristais de hematita na segmentação. Desta forma, cristais que apenas eram visíveis numa direção agora podem ser observados em sua totalidade (Figuras 3.1b e 3.1c).

Os ângulos de polarização foram intencionalmente escolhidos simétricos em relação ao ponto de extinção ( $+10^\circ$  e  $-10^\circ$ ) já que o método de segmentação proposto (CRM, ver Seção 3.3.2) foi concebido para o uso de ângulos simétricos. Na prática, se os ângulos foram assimétricos então apenas seria considerado o ângulo que leva ao maior contraste da imagem. Isto se deve à função máximo da Equação (3-3).[65]

Como demonstrado em trabalhos publicados, quanto menor for o ângulo de polarização, maior será o contraste entre os cristais de hematita (Figura 3.2).[65]

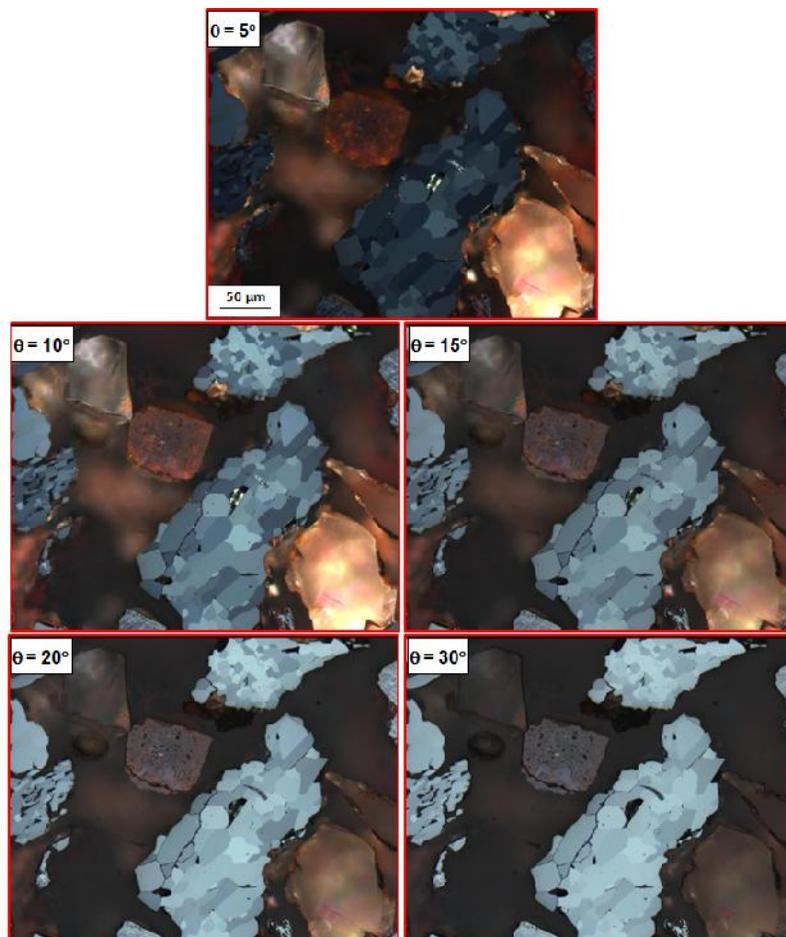


Figura 3.2: Influência do ângulo de polarização no contraste dos cristais.[65]

A Figura 3.2 está composta por 5 imagens LPOL de um mesmo campo. Estas imagens foram, respectivamente, polarizadas com ângulos crescentes ( $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ). Como pode ser observado, na medida em que o ângulo é menor, o contraste entre os cristais é maior. Contudo, se o ângulo for pequeno demais isto poderia terminar prejudicando a iluminação na imagem ( $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\theta)$ ). Deste modo,  $10^\circ$  é o ângulo mais indicado para ser usado na captura de imagens LPOL. Isto será demonstrado e devidamente justificado na seção dos resultados (Seção 4.1).

### 3.3 Crescimento de Regiões

Uma vez capturadas as imagens faz-se a identificação dos cristais de hematita. Para isto, a metodologia de trabalho envolve três etapas (Pré-processamento, Segmentação e Pós-processamento).

Dependendo se a imagem a ser processada for LPOL ou CPOL, podem ocorrer modificações particulares nas etapas. Estas modificações serão devidamente explicitadas em cada caso.

#### 3.3.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento está baseada no fluxograma da Figura 3.3.

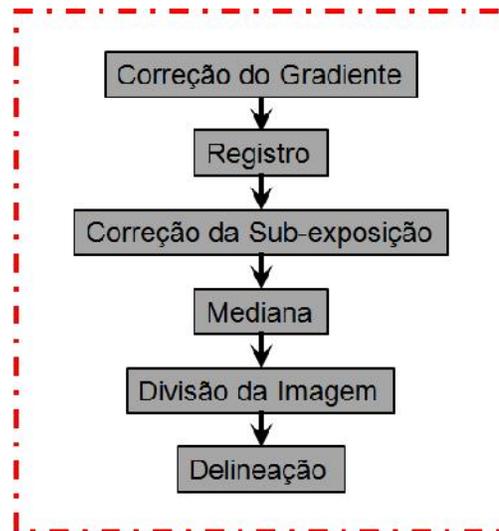


Figura 3.3: Fluxograma do pré-processamento.

O primeiro passo deste fluxograma é a correção do gradiente de iluminação, criado no caso particular das imagens CPOL. Para resolver este problema utiliza-se uma função do Axiovision chamada *Shading Correction*.

Esta função tem como entrada a imagem com o gradiente de iluminação (Figura 3.4a) e a imagem do fundo (Figura 3.4b), devolvendo uma imagem com fundo corrigido (Figura 3.4c).

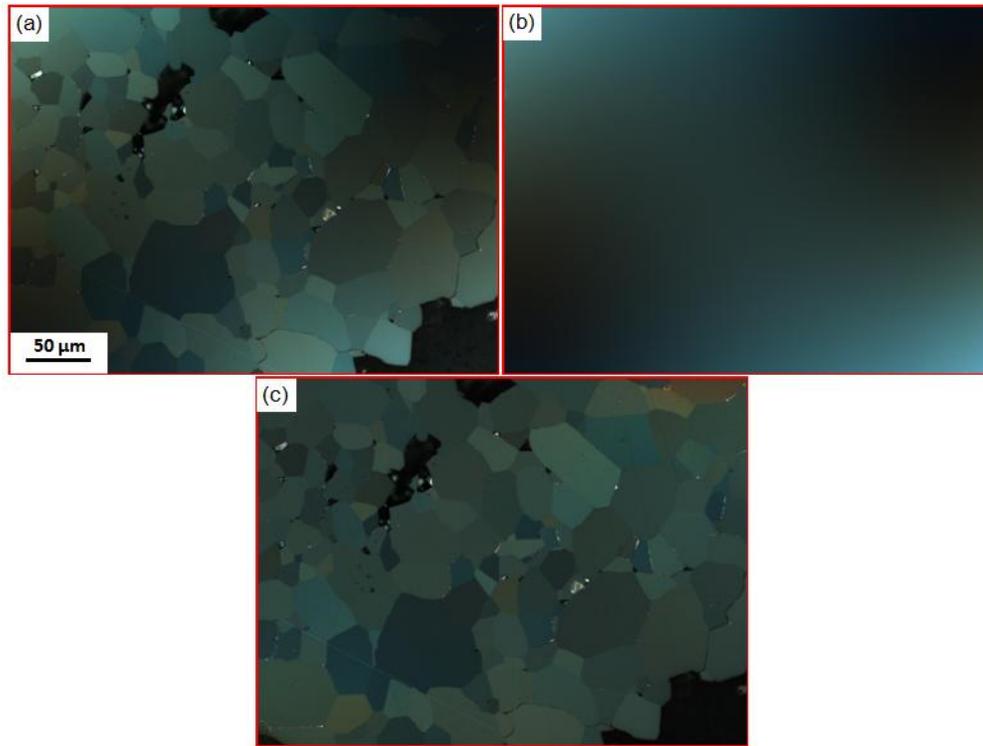


Figura 3.4: Correção do gradiente de iluminação.

Uma vez corrigido o gradiente de iluminação das imagens CPOL, todas as imagens pertencentes ao mesmo campo (a imagem SP, as duas imagens LPOL e a imagem CPOL) serão registradas. Desta forma garantimos que as 4 imagens do campo permaneçam geometricamente iguais com uma coerência pixel a pixel.

O desalinhamento presente nas quatro imagens é apenas de alguns poucos pixels, porém, suficientes para afetar significativamente o processo de segmentação dos cristais. Na realidade, este desalinhamento é dos mais simples, contendo apenas traslação da imagem, o que simplifica bastante a etapa de registro.

A origem do desalinhamento é geralmente fruto de uma combinação de dois fatores, um fator mecânico e outro ótico. O fator mecânico está relacionado à platina do microscópio, no caso particular do microscópio usado na aquisição das imagens (Zeiss AxioImager.M2m). Contudo, neste caso as quatro imagens pertencem ao mesmo campo e a platina permaneceu fixa. Deste modo, o fator mecânico é descartado.

Provavelmente o "desalinhamento ótico" entre a imagem SP e LPOL ocorre devido a que o sistema polarizador/analizador é montado ligeiramente oblíquo em relação ao eixo ótico para evitar reflexões espúrias no microscópio. Por sua vez, o "desalinhamento ótico" entre a imagem LPOL e CPOL (Figura 3.5) é em parte decorrente de aberrações produzidas pela separação e junção dos caminhos óticos inerentes ao processo de polarização circular. Este efeito, combinado com os gerados pelo processo de polarização linear, cria o desalinhamento espacial mostrado na Figura 3.5.

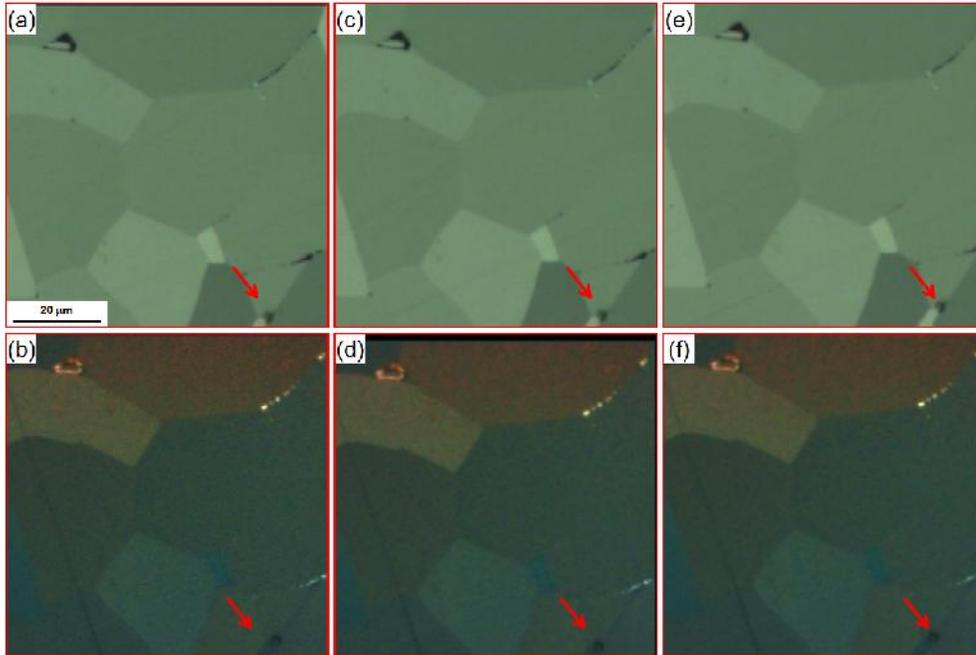


Figura 3.5: Registro de duas imagens de um mesmo campo: (a)-(b) Imagens LPOL e CPOL sem registrar; (c)-(d) Imagens LPOL e CPOL registradas e; (e)-(f) Imagens LPOL e CPOL registradas e com a borda preta eliminada.

Na Figura 3.5 pode-se observar um exemplo do registro feito em apenas duas imagens (das quatro) do um mesmo campo. Neste caso particular, escolheu-se apenas uma imagem LPOL e a imagem CPOL para reduzir o tamanho da figura. O par de imagens (a)-(b) mostra as imagens originais como foram capturadas no MLR. As setas desenhadas na figura foram colocadas de forma tal que sua posição relativa ao *frame* de cada imagem é a mesma. Deste modo, observando o poro para o qual as setas apontam, pode-se notar uma ligeira traslação da imagem CPOL com respeito à imagem LPOL. Ao mesmo tempo, o par de imagens (c)-(d) mostra o resultado do registro, porém com uma borda preta produto do processo. Finalmente, no par de imagens (e)-(f) observa-se as imagens registradas e com a borda preta eliminada.

É bom salientar que as imagens da Figura 3.5 são, na verdade, um fragmento de imagem (255 X 255 pixel). Isto foi motivado pelo reduzido tamanho do desalinhamento, precisando de uma ampliação para poder ser claramente observado. O campo original foi o mostrado na Figura 3.4.

Produto da absorção sofrida pela luz ao ser polarizada, tanto as imagens CPOL quanto as imagens LPOL sofreram de uma subexposição (Figura 3.6a e Figura 3.6b). Este foi mais um problema que teve que ser corrigido (Figura 3.6c e Figura 3.6d) na etapa de pré-processamento.

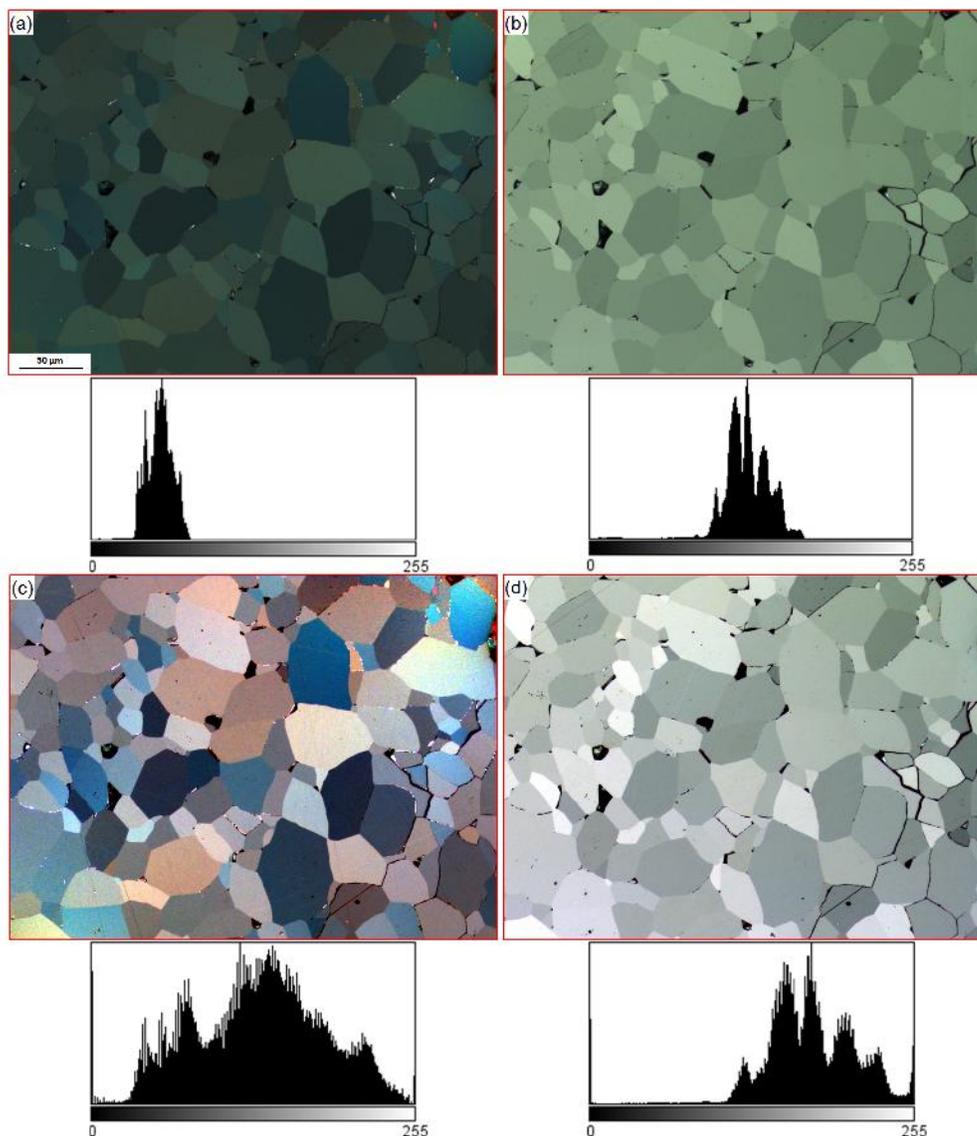


Figura 3.6: Correção da subexposição nas imagens CPOL e LPOL: (a) Imagem CPOL com subexposição; (b) Imagem LPOL com subexposição; (c) Imagem CPOL com correção da subexposição e; (d) Imagem LPOL com correção da subexposição.

Na Figura 3.6 pode ser observada cada imagem, com seu respectivo histograma, antes e depois da correção da subexposição. Dos histogramas correspondentes às Figuras 3.6a e 3.6b, pode-se observar claramente a subexposição sofrida pelas imagens. De igual forma, os histogramas das Figuras 3.6c e 3.6d mostram o problema resolvido.

A correção da subexposição revelou mais dois novos problemas com a imagem CPOL. Como pode ser observado na Figura 3.7, os cantos inferior esquerdo e superior direito ficaram com mais brilho que o resto da imagem. Ao mesmo tempo, como pode ser observado na ampliação destes cantos (Figura 3.7a e Figura 3.7b), essas regiões foram contaminadas por um ruído aleatório. Ambos problemas foram gerados pelo mesmo fator, uma deficiente correção do gradiente de iluminação.

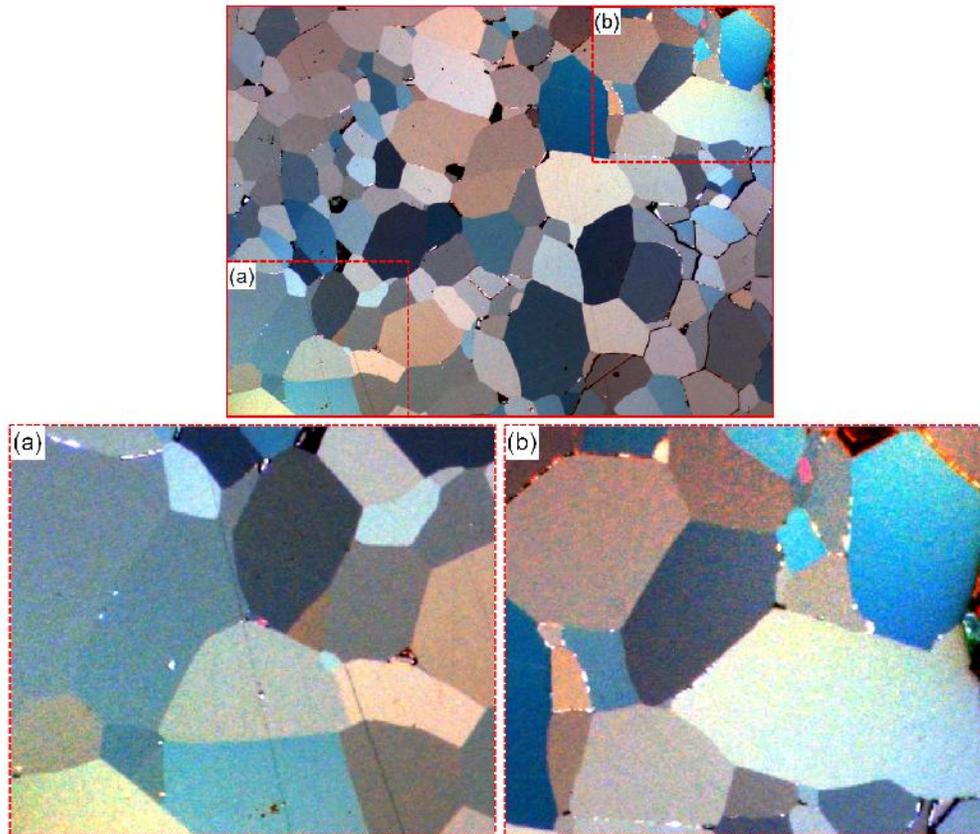


Figura 3.7: Problemas gerados na imagem CPOL ao corrigir o gradiente de iluminação com uma imagem de fundo inadequada: (a) Canto inferior esquerdo da imagem CPOL ampliado e (b) Canto superior direito da imagem CPOL ampliado.

O ruído aleatório foi eliminado com a aplicação de um filtro mediana. Já o problema de iluminação, que iria a prejudicar a segmentação dos cristais nessas regiões, foi resolvido dividindo a imagem CPOL em quatro quadrantes e

processando cada um deles como uma imagem individual. Deste modo o valor do limiar da segmentação  $t$  (Equação 3-4) nos quadrantes contendo as regiões afetadas pode ser diferente, melhorando assim a segmentação dos cristais.

Embora as imagens LPOL e SP não tenham sido afetadas por este problema, elas também foram divididas em quatro quadrantes para garantir uma correta comparação dos resultados. É bom salientar que isto foi uma medida paliativa para resolver a deficiente correção do gradiente de iluminação. É de vital importância que a imagem de fundo gerada para a correção do gradiente de iluminação seja feita com o maior dos cuidados, mantendo as mesmas condições de captura para o resto das imagens CPOL, evitando assim este tipo de problema.

Finalizando a etapa de pré-processamento, foi utilizada uma função de delineamento com o objetivo de realçar as bordas dos cristais. Esta função só foi utilizada nas imagens LPOL, já que as imagens CPOL utilizadas neste trabalho tiveram problemas de ruído, o qual poderia ser ressaltado com o uso de uma delineação. Se esse problema for evitado, então o uso de uma delineação nas imagens CPOL seria altamente recomendado.

### 3.3.2

#### Crescimento de Regiões Modificado

Foram propostas importantes modificações no algoritmo de crescimento de regiões clássico.[65, 67] Além da imagem de sementes, esse algoritmo utiliza uma imagem CPOL no caso de polarização circular e duas imagens LPOL no caso de polarização linear. Deste modo, a etapa de segmentação Crescimento de Regiões Modificado (CRM) está baseada no fluxograma da Figura 3.8.

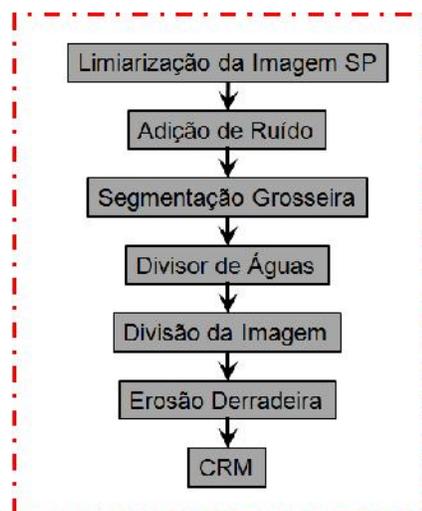


Figura 3.8: Fluxograma da segmentação pelo método CRM.

A segmentação da hematita (Figura 3.9) é realizada através da limiarização da imagem SP (Figura 3.9a). A imagem de hematita binária (Figura 3.9b), assim obtida, constitui uma máscara que é usada nas etapas de processamento seguintes com o objetivo de remover qualquer pixel fora da fase de interesse (hematita). Isto pode ser observado na Figura 3.9c, onde a hematita da imagem CPOL (da mesma forma para LPOL) é separada do resto das fases (Figura 3.9d).

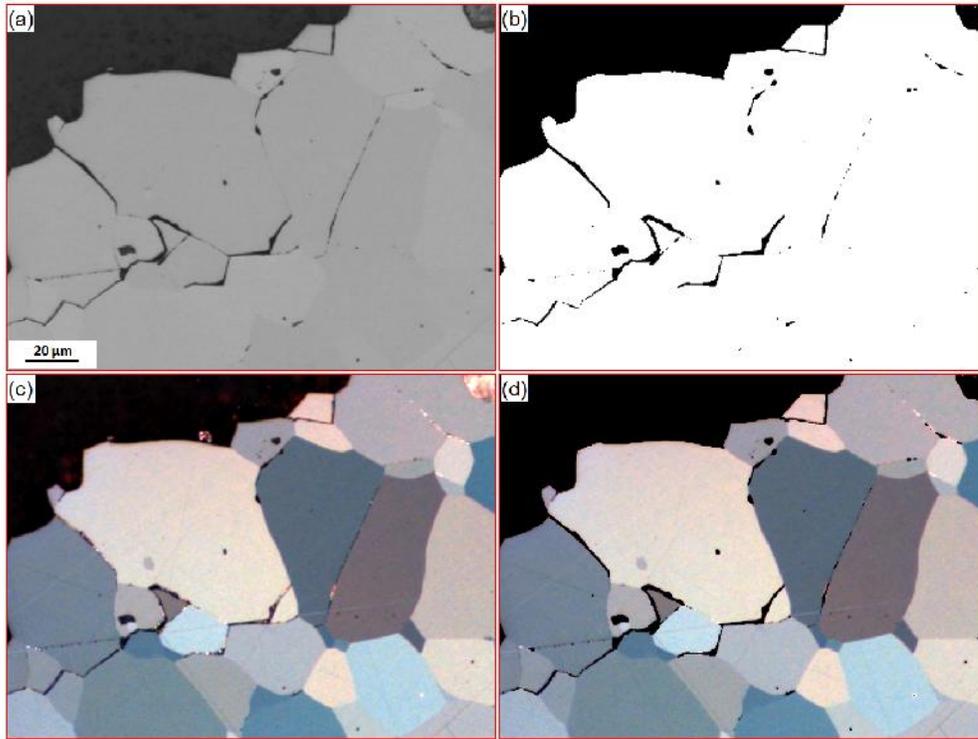


Figura 3.9: Segmentação da hematita: (a) Imagem SP; (b) Imagem binária da hematita segmentada; (c) Imagem CPOL com hematita e restos de fases espúrias e; (d) Imagem CPOL com hematita isolada.

Uma segmentação grosseira dos cristais de hematita foi realizada com ajuda do método clássico de detecção de bordas de Canny (Figura 3.10).[102] O termo grosseiro se justifica pois o objetivo não é detectar as bordas dos cristais mas sim criar o maior número de bordas possíveis, ainda que sejam espúrias. Para garantir isto, adiciona-se um ruído gaussiano nas imagens polarizadas.

Isto pode ser observado na Figura 3.10 para o caso particular de uma imagem CPOL. Na Figura 3.10a observa-se uma imagem CPOL normal e na Figura 3.10b observa-se a mesma imagem com um ruído gaussiano adicionado. Por sua vez, na Figura 3.10c pode ser visto o resultado do Canny sobre a imagem CPOL normal e, na Figura 3.10d, o resultado do Canny sobre a

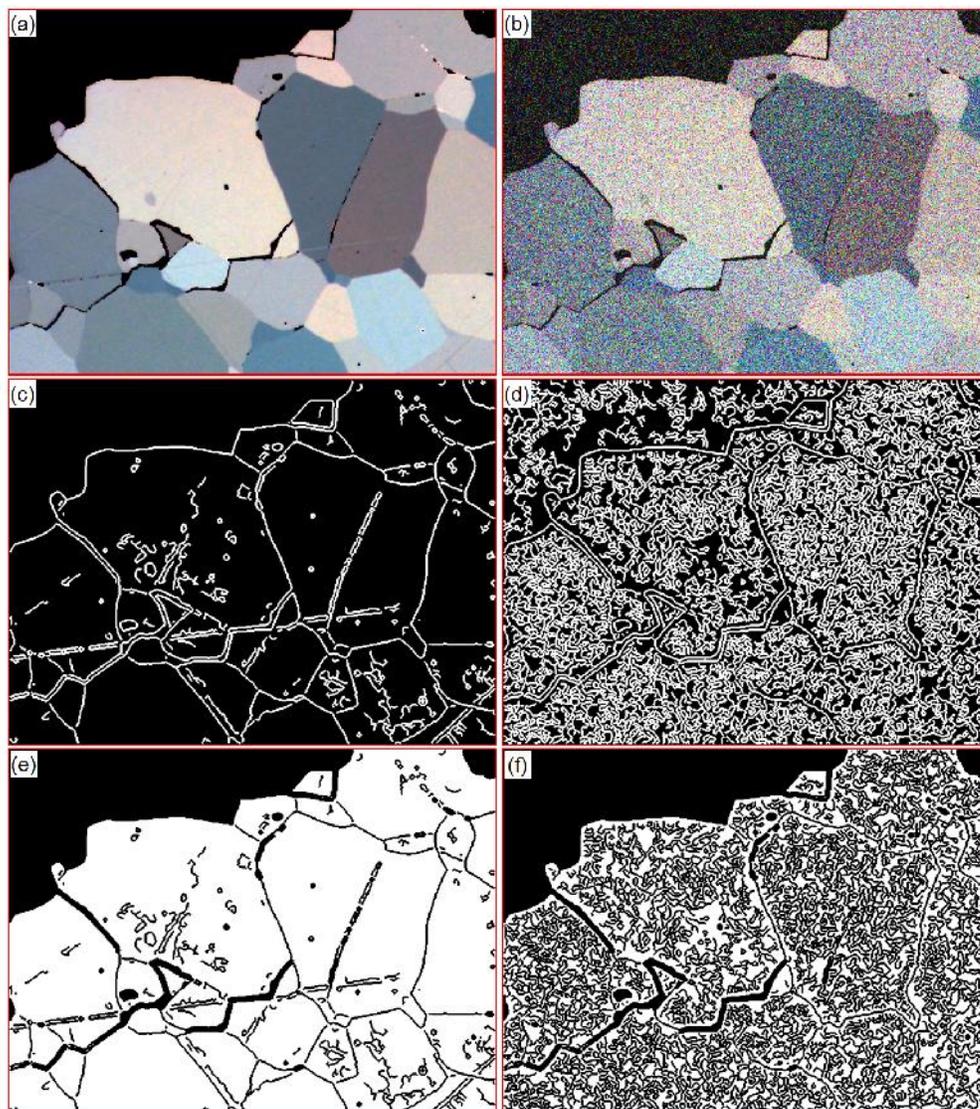


Figura 3.10: Segmentação grosseira dos cristais de hematita: (a) Imagem CPOL normal; (b) Imagem CPOL com ruído gaussiano; (c) Imagem resultante do Canny sobre a imagem normal; (d) Imagem resultante do Canny sobre a imagem com ruído; (e) Cristais de hematita segmentados através do Canny e; Cristais de hematita grosseiramente segmentados através do Canny.

imagem com ruído. Finalmente as Figuras 3.10e e 3.10f mostram as interseções dos complementos dos Canny com a imagem binária da hematita (Figura 3.9b). Fica evidente o número de fronteiras espúrias geradas pela segmentação grosseira do Canny sobre a imagem com ruído. No caso LPOL, a única diferença é que a detecção de bordas Canny é feita nas duas imagens LPOL e depois somadas.

Com o intuito de criar uma maior fragmentação dos cristais de hematita, grosseiramente segmentados, utiliza-se o método dos divisores de águas. Como

o objetivo é fragmentar ao máximo a imagem, o divisor de águas deve ser aplicado em excesso. Desta forma, aqueles fragmentos maiores ou aqueles que permaneciam conectados foram mais ainda fragmentados (Figura 3.11a).

Uma operação morfológica de erosão derradeira é aplicada sobre a imagem fragmentada. Deste modo, os fragmentos são reduzidos a sementes (Figura 3.11b) de tamanho igual a um pixel cada. Cada uma destas sementes encontra-se separada das outras por no mínimo um pixel.

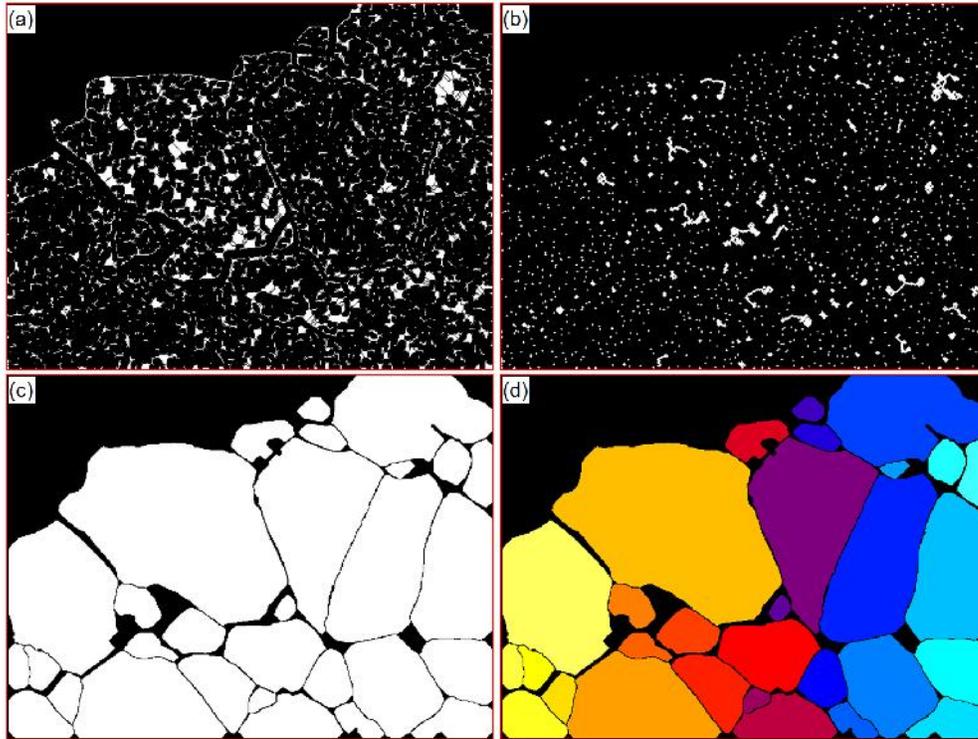


Figura 3.11: Segmentação final dos cristais de hematita: (a) Imagem binária resultante do divisor de águas; (b) Imagem binária com as sementes; (c) Cristais de hematita finalmente segmentados e; (d) Imagem colorida para ajudar na visualização dos cristais de hematita.

Finalmente, os cristais de hematita são corretamente discriminados (Figura 3.11c e 3.11d) através do método de segmentação CRM utilizando as sementes. Para conseguir isto, a distância espectral  $d_i^g(x, y)$  (Equação (3-1)), no espaço RGB, é calculada entre um ponto  $p(x, y)$  conectado ao cristal da imagem CPOL (ou das imagens LPOL, no caso de polarização linear) e sua correspondente semente  $p(x_g, y_g)$ . Se este valor (ou o máximo entre esses dois valores, no caso de polarização linear) de distância espectral (Equação (3-2) para CPOL e Equação (3-3) para LPOL) é menor que certo limiar  $t$  (Equação (3-4)), podemos afirmar que este ponto pertence ao cristal em questão. Esta definição

pode ser resumida nas seguintes equações:

$$d_i^g(x, y) = \left\| \left[ \begin{array}{c} R_i(x, y) \\ G_i(x, y) \\ B_i(x, y) \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} R_i(x_g, y_g) \\ G_i(x_g, y_g) \\ B_i(x_g, y_g) \end{array} \right] \right\| \quad (3-1)$$

onde  $i = 1$  para as imagens CPOL (uma imagem só) e  $i = 1, 2$  para as imagens LPOL;  $d_i^g(x, y)$  é a distância espectral no espaço RGB entre os pontos  $p(x, y)$  e  $p(x_g, y_g)$  na imagem polarizada  $i$ ; e  $[R_i(x, y), G_i(x, y), B_i(x, y)]$  e  $[R_i(x_g, y_g), G_i(x_g, y_g), B_i(x_g, y_g)]$  são os valores RGB do ponto  $p(x, y)$  e da semente  $p(x_g, y_g)$  da correspondente imagem polarizada  $i$ ;

$$d^g(x, y) = d_1^g(x, y) \quad (3-2)$$

$$d^g(x, y) = \max(d_1^g(x, y), d_2^g(x, y)) \quad (3-3)$$

$$d^g(x, y) < t \quad (3-4)$$

onde  $t$  é um parâmetro definido pelo usuário e;  $d^g(x, y)$  é a distância espectral (máxima no caso LPOL) no espaço RGB entre os pontos  $p(x, y)$  e  $p(x_g, y_g)$ .

Esta metodologia utiliza apenas uma função de pós-processamento: um fechamento morfológico na hora do crescimento das regiões, evitando assim, a formação de trincas ou poros falsos no interior dos cristais. Esta metodologia funciona bastante bem, embora seja sensível a alguns arranhões e a problemas de iluminação nas bordas das partículas. Razão pela qual as etapas de preparação da amostra e de aquisição da imagem devem ser realizadas com muito cuidado.

Para finalizar, esta metodologia foi totalmente criada em Matlab pelas facilidades de programação que esse software oferece. Em contrapartida, devido às limitações de programação do Axiovision, o método de crescimento de regiões ainda não pode ser implementado neste ambiente.

### 3.4

#### Método de Canny-Watersheds

Até aqui foram observados dois métodos quase idênticos do ponto de vista de PADI, porém com diferenças claras de MD. O uso da imagem CPOL tem a vantagem de simplificar o trabalho tanto de PADI quanto de MD. Porém, o uso da imagem CPOL poderia simplificar ainda mais o trabalho de PADI ao usar um método mais simples de segmentação (Canny, por exemplo). As imagens CPOL apresentam um melhor contraste entre os cristais, permitindo ao Canny ser mais eficiente neste tipo de imagens que nas LPOL.

Em contrapartida, o contraste entre os cristais de uma imagem LPOL

seria insuficiente para conseguir uma boa segmentação por Canny. Contudo, pareceria uma boa ideia somar os Canny de cada imagem LPOL ( $+10^\circ$  e  $-10^\circ$ ), porém isto também aumentaria as regiões espúrias. Ao mesmo tempo, se o registro não for perfeito, a soma dos dois Canny iria criar bordas duplas.

Outra vantagem de usar a Canny é sua maior disponibilidade em softwares comerciais de processamento digital de imagens. Por outro lado, o desenvolvimento desta tese está estreitamente relacionado com o projeto de pesquisa que o DEMa tem com a Vale. Ao mesmo tempo, por questões de integração do software com o microscópio e por políticas internas, a Vale tem preferência por sistemas implementados em Axiovision. É assim que a metodologia Canny-Watersheds (CW) seria a mais indicada para ser usada na Vale, servindo como motivação extra para seu desenvolvimento.

A etapa de pré-processamento da metodologia CW usando uma imagem CPOL é basicamente a mesma usada no método anterior. Assim, o detalhamento desta metodologia vai começar pela etapa de segmentação dos cristais.

### 3.4.1 Segmentação

A etapa de segmentação está baseada no fluxograma da Figura 3.12.

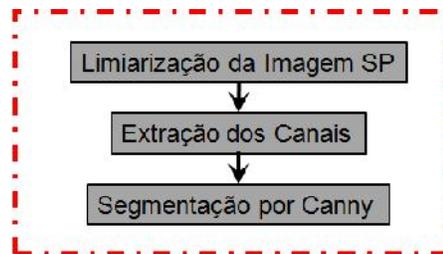


Figura 3.12: Fluxograma da segmentação pelo método CW.

O primeiro passo deste fluxograma é a limiarização da hematita na imagem SP para ser usada como máscara. Aqui como na outra metodologia, a máscara da hematita binária é usada para separar a hematita do resto da imagem. O resultado deste passo é exatamente o mesmo observado na Figura 3.9.

O próximo passo é separar a imagem CPOL em seus três canais (Vermelho - Figura 3.13a, Verde - Figura 3.13b e Azul - Figura 3.13c) já que a função Canny foi originalmente concebida para ser usada em imagens de tons de cinza. Uma vez separados os três canais, as bordas dos cristais são identificadas pelo método de Canny (Figura 3.13d, 3.13e e 3.13f). E finalmente, somando as

imagens resultantes de cada canal podemos obter o Canny da imagem CPOL (Figura 3.13g).

Este processo deve ser realizado com muito cuidado, escolhendo adequadamente as variáveis da função Canny, com a finalidade de não gerar bordas espúrias no Canny de cada canal. E conseqüentemente, no Canny resultante da imagem CPOL.

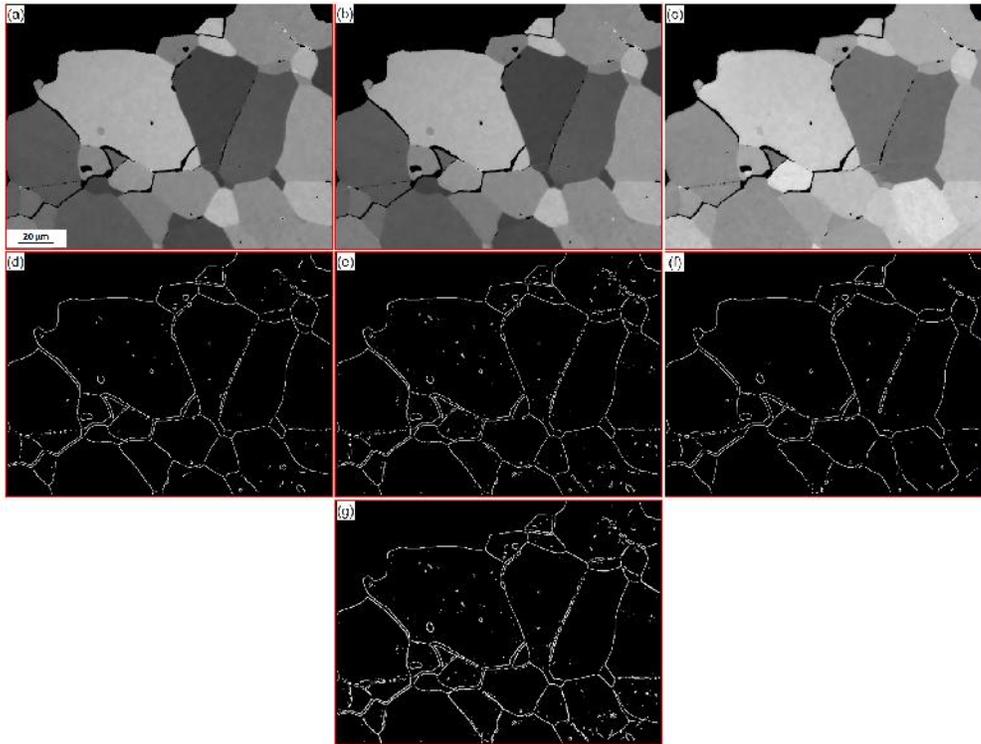


Figura 3.13: Canny da imagem CPOL: (a) Canal vermelho da imagem CPOL; (b) Canal verde da imagem CPOL; (c) Canal azul da imagem CPOL; (d) Canny da imagem do canal vermelho; (e) Canny da imagem do canal verde; (f) Canny da imagem do canal azul e; (g) Soma dos três Canny.

Até aqui a etapa de segmentação é muito simples. Contudo, pode ser observado que as fronteiras dos cristais não foram corretamente fechadas. Além disso, apesar do esforço para eliminar as bordas espúrias, várias foram criadas. Para resolver estes problemas, diferente da anterior, esta metodologia precisa de uma intensa etapa de pós-processamento.

### 3.4.2

#### Pós-processamento

Após ter detectado as bordas dos cristais pelo método CW precisa-se de uma rotina de pós-processamento para melhorar o resultado da segmentação. Esta rotina de pós-processamento está baseada no fluxograma da Figura 3.14.

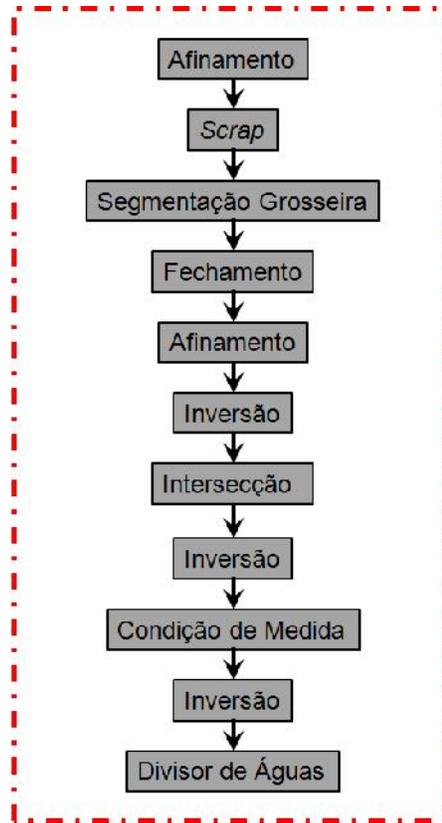


Figura 3.14: Fluxograma do pós-processamento do método CW.

O primeiro passo do fluxograma é fazer um afinamento (Figura 3.15b) das bordas dos cristais (Figura 3.15a). O objetivo deste passo é minimizar a conectividade 8 entre os objetos vizinhos. Deste modo, a função *Scrap* do Axiowision, que faz uma segmentação de objetos por tamanho e que não diferencia objetos com vizinhança 8, pode eliminar os objetos que tenham área, ou seja, número de pixels, dentro de uma determinada faixa de valores. Assim, com a função *Scrap* é feita a primeira limpeza da imagem (Figura 3.15c), eliminando pequenos objetos espúrios.

Contudo, isto não é suficiente para desprender objetos espúrios que ficaram ligados a bordas reais. Assim, se faz uma sequência de fechamento (euclídeano, para não deformar objetos) e afinamento com a intenção de separar esses objetos espúrios (Figura 3.15d).

O próximo passo é inverter a imagem e obter sua intersecção com a máscara da hematita (Figura 3.9b) para formar a imagem da Figura 3.15e. Como pode ser observado, ainda restam objetos espúrios que viraram poros falsos nos cristais de hematita.

Para tentar remover estes poros falsos, sem afetar as bordas reais incom-

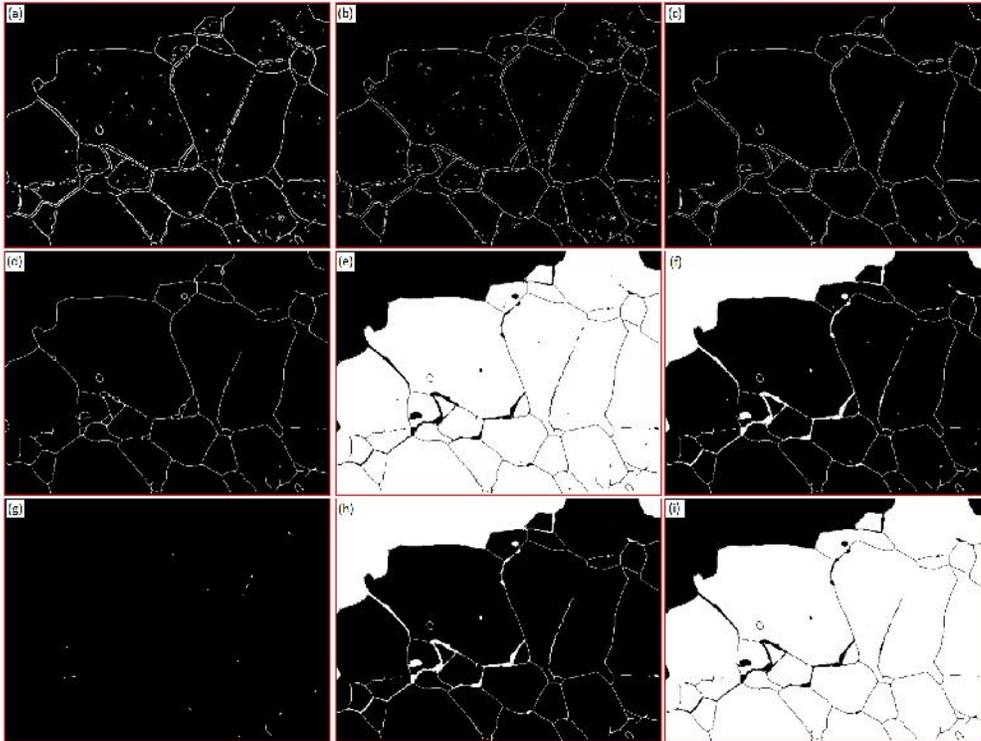


Figura 3.15: Sequência de pós-processamento para eliminar objetos espúrios na imagem segmentada.

pletas, inverte-se a imagem novamente (Figura 3.15f) e se utiliza uma condição de medida. Esta condição de medida está relacionada com a razão de aspecto e a área dos objetos, garantindo deste modo não eliminar objetos finos e compridos que poderiam ser fragmentos de bordas ainda incompletas.

Assim, todos os objetos que não cumpram a condição (Figura 3.15g) são excluídos da imagem (Figura 3.15h). A imagem resultante é invertida novamente para finalmente obter os cristais de hematita segmentados (Figura 3.15i).

Como pode ser observado (Figura 3.15i) o resultado da segmentação por Canny ainda não conseguiu separar corretamente todos os cristais de hematita. Para resolver este problema vai ser necessário utilizar o método do divisor de águas. Como o método do divisor de águas não existe como uma função em alguns softwares de processamento digital de imagens (incluindo o Axiovision), ele terá que ser implementado.

O primeiro passo para criar o método do divisor de águas é calcular o MDE (Figura 3.16b) da imagem da Figura 3.16a. A seguir, inverte-se a imagem do MDE e aplica-se um filtro passa-baixa (Figura 3.16c) sobre a imagem. Finalmente sobre o resultado desta inversão é aplicada a função *watersheds* do

Axiovision para assim completar as bordas incompletas (Figura 3.16d).

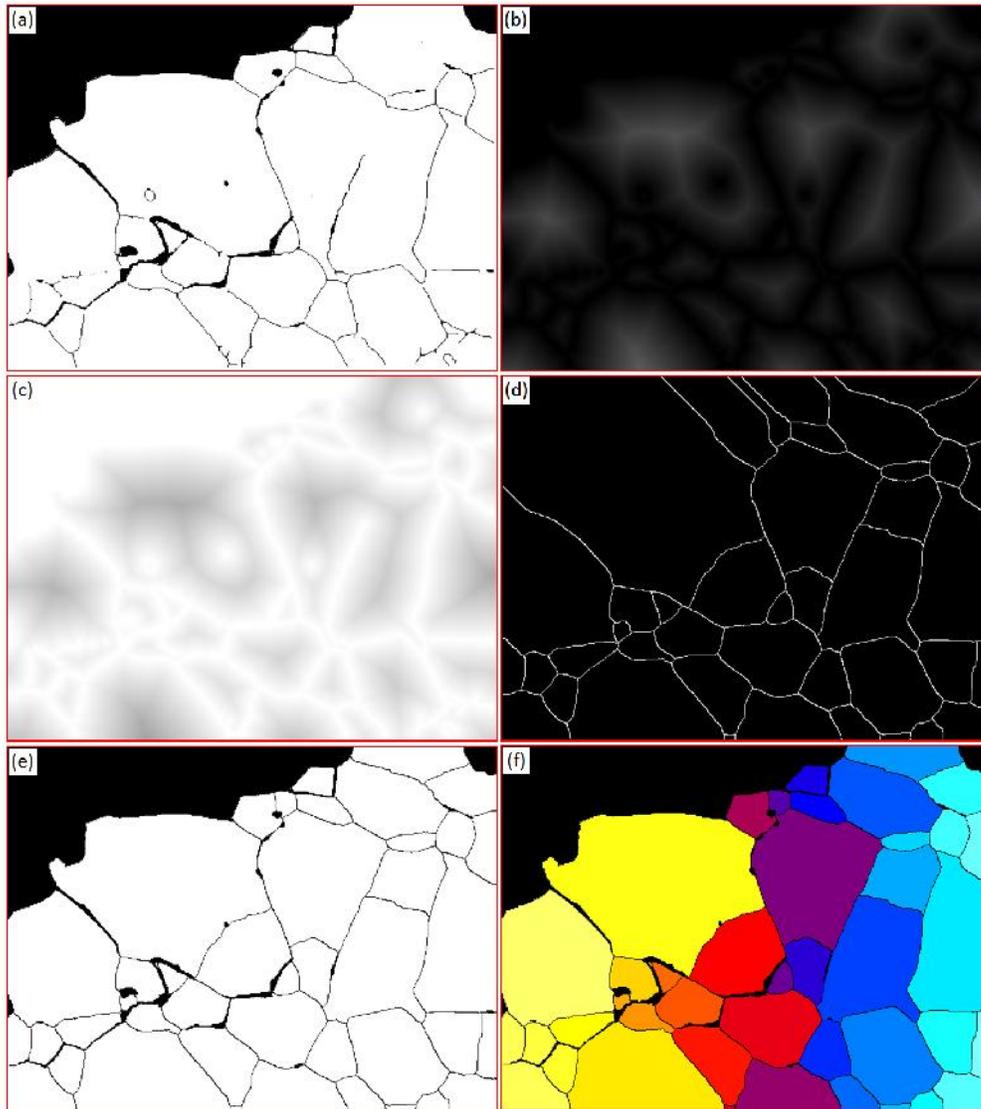


Figura 3.16: Método do divisor de águas usado para corrigir bordas incompletas do Canny.

O propósito do filtro passa-baixa, neste caso, é eliminar as altas frequências na imagem do MDE invertida já que a função *watersheds* é muito sensível a altas frequências. A imagem resultante do *watersheds* é novamente invertida e interceptada com a máscara da hematita (Figura 3.9b) para obter a imagem final dos cristais separados (Figura 3.16e). Na Figura 3.16f foi utilizada uma tabela de cores (*Colour Look-Up table* - CLUT) com a mera intenção de facilitar a visualização dos cristais.

### 3.5

#### Classificação

Após ter segmentado os cristais pelos 3 métodos o próximo passo seria pré-classificar manualmente os cristais para criar um banco de dados que será usado na atribuição das classes. A dificuldade é que seriam aproximadamente 70 imagens por cada método para classificar manualmente, ou seja, cerca de 210 imagens ao total. Se consideramos todos os cristais segmentados por cada método daria um total de 27594 cristais, requerendo um esforço enorme do operador.

Além disso também seria quase impossível impedir que alguns cristais de uma mesma imagem fossem pré-classificados como pertencendo a mais do que uma classe. Isto poderia trazer consequências drásticas na hora da classificação, confundindo o classificador e diminuindo consideravelmente a taxa de acerto.

Deste modo, para evitar estes problemas foi criada uma rotina de pré-classificação semiautomática das classes. O primeiro passo desta rotina é aplicar uma condição de medida na imagem para separar os cristais por classes em três imagens independentes.

A escolha desta medida baseou-se nos conhecimentos prévios da morfologia de cada classe. Por definição, a hematita lamelar se diferencia da granular em que a maior projeção dos cristais lamelares é maior do que o dobro dos cristais granulares. As demais características morfológicas destas duas classes são as mesmas. Por outro lado, a característica morfológica principal da hematita lobular é bem diferente das outras classes. A hematita lobular apresenta contornos muito sinuosos, diferentemente de granulares e lamelares que apresentam contornos suaves.

Deste modo, as condições de medidas foram criadas primeiramente para eliminar a classe que mais se diferencia das demais, ou seja, a lobular. Para isto utilizou-se a medida de região chamada Solidez (Equação (2-56)), e todos os cristais que obedeceram a condição foram colocados em uma imagem nova. Com os cristais restantes utilizou-se como condição outra medida de região chamada Razão de Aspectos (Equação (2-50)). Deste modo, os cristais com  $RA < 0,5$  são lamelares, gerando uma nova imagem, enquanto os restantes são granulares.

Assim são formadas três imagens novas, cada uma contendo os candidatos mais prováveis de cada classe. A decisão final cabe ao operador, que usando a função *Binary Image Editor* do Axiovision, elimina com um simples *click* do mouse os cristais que ele achar não pertencer a essa classe.

Deste modo, o processo de pré-classificação transforma-se em semi-automático simplificando o trabalho do operador. Ao mesmo tempo, resolve-se

o problema de classificar um mesmo cristal como pertencendo a mais de uma classe. Finalmente os cristais estão prontos para serem medidos e classificados.