

6 Materiais e Métodos

Este capítulo descreve detalhadamente os procedimentos experimentais realizados neste trabalho, apresentando as técnicas e os equipamentos utilizados.

6.1. Materiais e Preparação de Amostras

Para a execução deste trabalho, a Vale forneceu ao DEMa amostras de pelotas de minério de ferro específicas para alto-forno.

Foram utilizadas seções polidas, nas quais a estrutura interna das pelotas ficou exposta no seu diâmetro máximo. Antes do embutimento, as pelotas passaram por impregnação a frio com resina isofitálica de cura lenta, a fim de evitar a degradação física e a perda do material durante o polimento. Após a impregnação, a superfície diametral foi previamente lixada, e as pelotas foram embutidas a quente com resina acrílica no Pronto Press 20, com temperatura máxima de 180°C. Para o processo de lixamento e polimento, utilizou-se o sistema semi-automático Tegra Force-3 da Struers com lixas de diferentes gramaturas e panos de polimento, segundo o método convencional. Para eliminar o risco de abertura de poros e perda de material, antes do polimento, retornou-se quantas vezes necessário à etapa de impregnação fina para fechamento dos poros e fixação do material.

6.2. Procedimentos Experimentais

A metodologia adotada no trabalho baseia-se em duas principais etapas: aquisição de imagens ao microscópio óptico e análise de imagens.

6.2.1. Microscopia Ótica

O microscópio óptico utilizado foi o *Zeiss Axioplan 2*, equipado com câmera digital *Zeiss AxioCam HR* (resolução de 1300x1030 pixels e quantização de 8

bits) e automatizado através do *software* AxioVision (Versão 4.8.2) do Laboratório de Microscopia Digital do DEMa/PUC-Rio.

Antes de iniciar o processo de aquisição de imagens, fez-se necessária a execução de alguns procedimentos, visando à obtenção de imagens sob as mesmas condições durante todo o processo e com qualidade suficiente para seguir nas etapas posteriores. Esses procedimentos estão listados abaixo:

a) Correção de fundo, na qual problemas com iluminação, por exemplo, são eliminados. A correção de fundo foi feita com o uso de uma amostra de SiC, em que uma imagem de fundo para a lente objetiva utilizada foi gerada e, automaticamente, esta imagem foi subtraída de cada imagem capturada da amostra.

b) A intensidade da iluminação foi mantida constante durante toda a aquisição de imagens;

c) O tempo de exposição e o equilíbrio de branco (*White Balance*) foram otimizados em um único campo de cada amostra e mantidos constantes em todos os campos subsequentes de cada uma delas.

O tempo de exposição da câmera permite o acúmulo de mais ou menos sinal no detector. Imagens com pouca luz, por exemplo, requerem longos tempos de exposição para que adquiram qualidade suficiente para processamento (Paciornik, 2010). Para que o parâmetro seja ajustado da melhor forma possível, deve-se escolher um campo da amostra contendo a fase de pixels mais brilhantes.

Já o equilíbrio de branco (*White Balance*) é um parâmetro que define o nível de branco na imagem. Isto faz com que a imagem gerada pela câmera seja cromaticamente similar à observada diretamente no microscópio (Paciornik, 2010). O *White Balance* pode ser ajustado se houver alguma região suficientemente branca na imagem.

d) A lente objetiva utilizada foi a de 20X (NA 0,40), o que corresponde a uma resolução de 0,53 μm /pixel.

e) As imagens foram adquiridas de forma automática através do método *LMD Captura* (Seção 4.2.2). Os parâmetros de entrada necessários podem ser visualizados no exemplo da Figura 46.

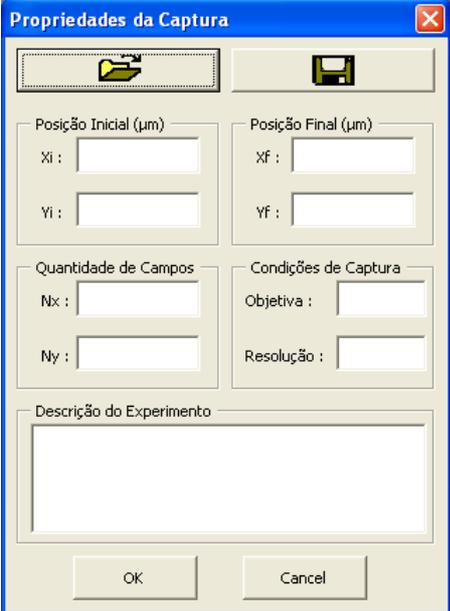


Figura 46 – Parâmetros de entrada para a aquisição automática de imagens pelo método *LMD Captura*

f) Foram adquiridas imagens nos modos de campo claro e de polarização. As imagens de campo claro foram utilizadas para a extração de todos os atributos e as de polarização somente na extração de parâmetros de textura.

A Figura 47 é uma imagem típica de pelota de minério de ferro obtida no microscópio ótico de luz refletida com lente objetiva de 20X. As diversas fases presentes, que podem ser identificadas por esta técnica, estão indicadas na figura. Já a Figura 48 é uma imagem típica de luz polarizada do mesmo campo da imagem da Figura 47.

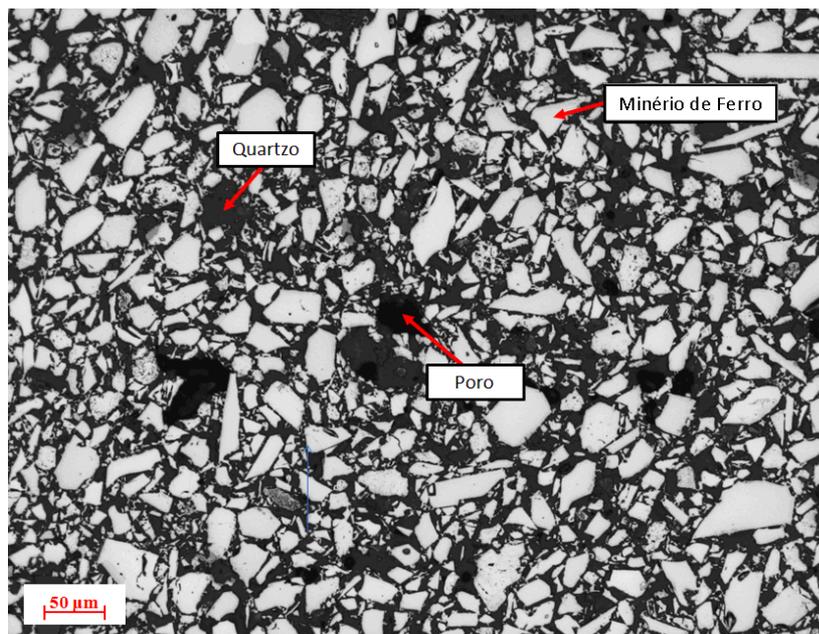


Figura 47 – Imagem típica da pelota em um aumento de 20X adquirida em campo claro

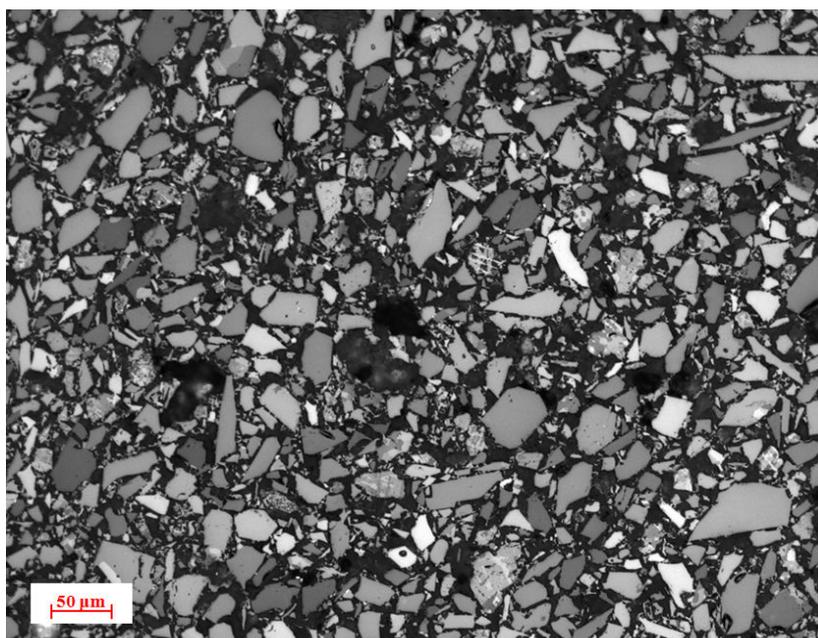


Figura 48 – Imagem típica da pelota em um aumento de 20X adquirida em polarização

Por se tratar de um trabalho empírico, a princípio foram adquiridas 915 imagens em campo claro e em polarização de diferentes amostras de pelotas de alto-forno. Estas imagens foram classificadas visualmente por uma especialista da área em suas respectivas classes e foram utilizadas nas medidas de textura utilizando-se imagens polarizadas.

Depois de testar a relevância dos resultados obtidos nas medidas de polarização, as 915 imagens passaram por uma classificação visual mais rigorosa por meio de uma especialista da área e mais duas pessoas treinadas para isto, selecionando-se as de características mais marcantes de cada classe e evitando-se as que pudessem confundir o classificador por conter características atípicas. Após este refino, apenas 725 imagens, das quais 208 campos representam a classe A, 102 a classe B, 272 a classe C e 143 a classe D, foram aproveitadas.

Em seguida, selecionou-se 102 imagens de cada classe, cujo valor é o de menor quantidade e corresponde ao da classe B, para evitar preferências na classificação automática. Por fim, dividiram-se estas imagens em quatro partes, a fim de aumentar o banco de dados e melhorar a classificação, gerando um total de 1632 imagens. A Figura 49 é um exemplo de como foi feita a divisão das imagens originais em quadrantes.

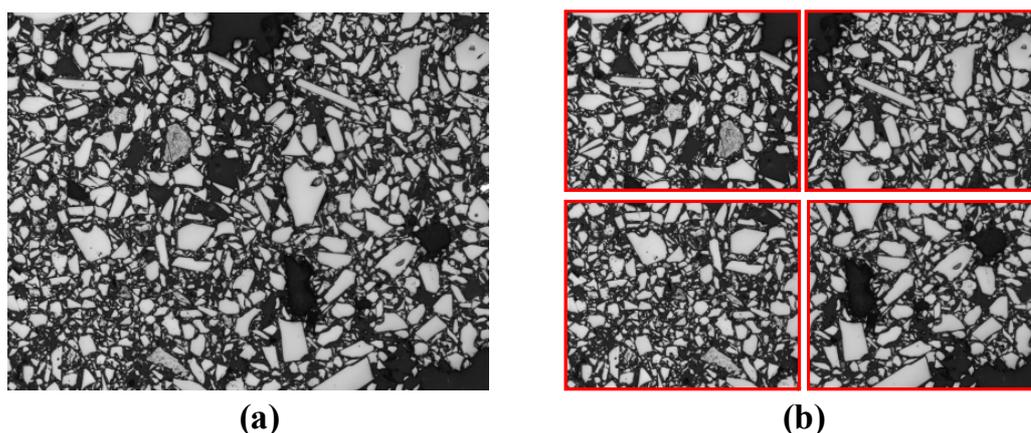


Figura 49 – (a) Imagem original; (b) Quadrantes da imagem original

6.2.2. Processamento de Imagens

Uma vez capturadas as imagens, iniciou-se a sequência de processamento e análise propriamente dita. Todas as etapas do processamento das imagens e da extração dos atributos foram executadas no *software* KS400.

A Figura 50 apresenta o histograma de intensidades e os picos correspondentes às diversas fases presentes na amostra de pelota de minério de ferro da Figura 47. O histograma é importante para a segmentação da imagem, na qual se identifica tons de separação entre os picos que representam as fases,

gerando uma imagem binária com as regiões de interesse para a extração dos atributos. Vale ressaltar que a extração de atributos das partículas se refere somente às partículas de minério de ferro.

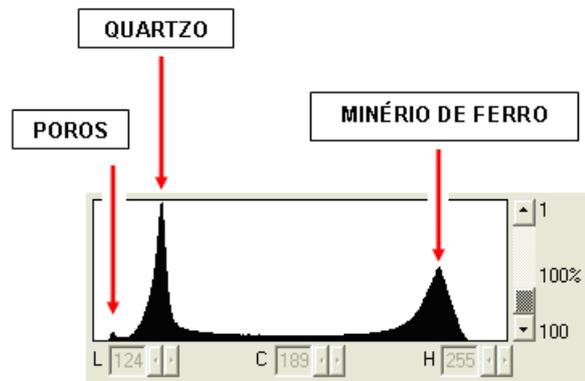


Figura 50 – Histograma de intensidades da Figura 47

Como as imagens passaram por processamentos distintos, dependendo do tipo de atributo a ser extraído, esta seção foi dividida em 6 grupos contendo diferentes parâmetros obtidos a partir do mesmo processamento.

A escolha dos atributos a se extrair foi feita baseada em parâmetros supostamente capazes de diferenciar as diversas classes, seja diferenciando todas as classes ou uma das classes das demais classes. A relevância de cada parâmetro será avaliada na etapa de classificação.

- Grupo I

Neste grupo, as medidas foram feitas em imagens contendo as partículas conectadas entre si. Os parâmetros extraídos neste grupo foram:

- Contagem de partículas conectadas (CPC);
- Fração de área;
- Medidas de intercepto.

Como nas pelotas de grau de maturação A as partículas ainda não estão conectadas umas às outras, é de se esperar que o número de partículas seja muito maior do que o número de partículas dos demais graus de maturação, indicando que a contagem de partículas seria um bom atributo de diferenciação entre as classes A e B, C e D.

A fração de área pode dar uma informação de quantidade de partículas e quantidade de poros/fundo na imagem da pelota. No grau de maturação D, por exemplo, as partículas estão completamente ajustadas morfológicamente, o que configuraria uma imagem contendo uma região de partículas muito maior do que uma região de poros/fundo. Pensando desta forma, isso implicaria numa fração de área maior no grau de maturação D do que nas demais classes.

As medidas de intercepto podem dar informações a respeito da distância entre as partículas ou de seu tamanho médio. Provavelmente é um bom parâmetro para diferenciar todas as classes, pois terão respostas diferentes em todos os graus de maturação em virtude das diferentes características das partículas.

- Grupo II

Os parâmetros deste grupo foram extraídos a partir das imagens com as partículas desconectadas. São eles:

- Contagem de partículas desconectadas (CPD);
- Área simples;
- Perímetro simples;
- Diâmetro circular equivalente (DCE);
- Fatores de forma circular (FFC_1 e FFC_2);
- Medidas de convexidade ($Conv_1$ e $Conv_2$);
- Razão de aspecto (RA);

A contagem de partículas desconectadas será praticamente a mesma para todas as classes. Porém, ao ser combinada com CPC numa “Razão de partículas”, é possível obter alguma informação capaz de diferenciar as imagens de graus de maturação diferentes.

Como as partículas possuem diferentes tamanhos e formas distintas, dependendo da classe, parâmetros que descrevam essas características, tais como área, perímetro, DCE, FFC, Conv e RA são uma boa escolha para diferenciar uma classe da outra.

- Grupo III

Os parâmetros contidos no Grupo III são referentes às medidas de textura das imagens. Por isso, foram extraídos diretamente a partir das imagens em tons de cinza. Os parâmetros extraídos foram:

- Média de tons de cinza;
- Desvio padrão da intensidade;
- Parâmetros de Haralick (1 ao 11).

Como as imagens de cada grau de maturação seguem um “padrão” diferente, espera-se que os parâmetros relativos à textura sejam capazes de diferenciá-las.

- Grupo IV

Todas as medidas deste grupo foram feitas em imagens contendo somente os poros pequenos. Os parâmetros foram:

- Fração de área;
- Área simples;
- Perímetro simples;
- Diâmetro circular equivalente (DCE);
- Medidas de interceptos;
- Fatores de forma circular (FFC₁ e FFC₂);
- Medidas de convexidade (Conv₁ e Conv₂);
- Fatores de ramificação (MR e BF).

À medida que o grau de maturação vai caminhando no sentido de A para D, começam a surgir poros, cada qual com um formato e um tamanho diferente. Parâmetros que forneçam informações de quantidade, tamanho e forma dos poros podem ser úteis para diferenciar os graus de maturação. Isto explica a escolha dos parâmetros citados acima.

- Grupo V

Neste grupo, os parâmetros foram obtidos em imagens invertidas das originais segmentadas, ou seja, nas imagens contendo poros (grandes e pequenos).

Os parâmetros medidos foram:

- Medidas de interceptos.

A ideia destas medidas de interceptos, neste caso, é obter qualquer informação a respeito do tamanho de poros e como estão conectados entre si.

- Grupo VI

Os parâmetros deste grupo consistem em medidas de textura feitas em imagens polarizadas. Assim como no Grupo III, os parâmetros obtidos foram:

- Média de tons de cinza;
- Desvio padrão da intensidade;
- Parâmetros de Haralick (1 ao 11).

Tendo em vista que, neste caso, as imagens polarizadas apresentam maiores diferenças de tonalidade entre as partículas de orientações diferentes (grau de maturação A) e nenhuma variabilidade entre as partículas de mesma orientação, como se espera que ocorra com as partículas com grau de maturação D, as medidas de textura em imagens polarizadas parecem revelar bastante informação para a diferenciação dos referidos graus de maturação.

Vale ressaltar que do grupo I ao grupo V todas as medidas foram feitas em imagens de campo claro; já o grupo VI teve suas medidas realizadas somente sobre as imagens polarizadas.

6.2.2.1. Parâmetros I

A sequência de processamento utilizada para a extração dos atributos do grupo I é mostrada na Figura 51. A fim de facilitar o entendimento dos objetivos específicos em cada etapa executada, a sequência padrão de PADI foi adaptada para este caso (e para os casos dos outros grupos também), apresentando os nomes das funções utilizadas.

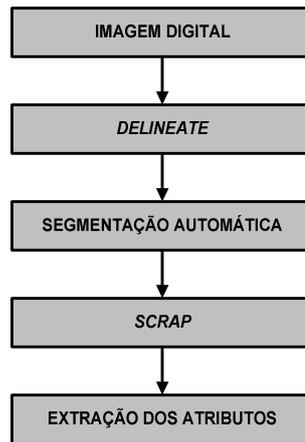


Figura 51 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo I

Os picos nem sempre estão bem separados e definidos como foram apresentados na Figura 50. Para evitar este tipo de problema e facilitar a segmentação das imagens, utilizou-se uma função de realce de bordas, chamada *Delineate*. Nesta função, dois parâmetros (*Threshold* e *Size*) podem ser modificados. *Threshold* é o limiar que define se o pixel analisado está localizado na borda do objeto, enquanto *Size* é o tamanho da matriz do filtro de análise.

Após a aplicação do filtro de realce de bordas, realizou-se, na imagem resultante, a segmentação das partículas. Como a escolha manual dos tons de corte não é nem precisa e nem reproduzível, optou-se, neste trabalho, pela segmentação automática. O método automático utilizado foi o de Otsu, o qual determina o tom de corte que maximiza uma medida de variância entre as duas classes do histograma. É um método extremamente eficiente, reproduzível e é o mais implementado em programas de PDI (Paciornik, 2010).

A Figura 52 mostra a imagem original (Figura 52-a), a imagem após a aplicação do *Delineate* (Figura 52-b), a imagem segmentada (Figura 52-c) e o histograma (Figura 52-d) com o pico da fase correspondente, neste caso referente às partículas de hematita, selecionado na segmentação automática.

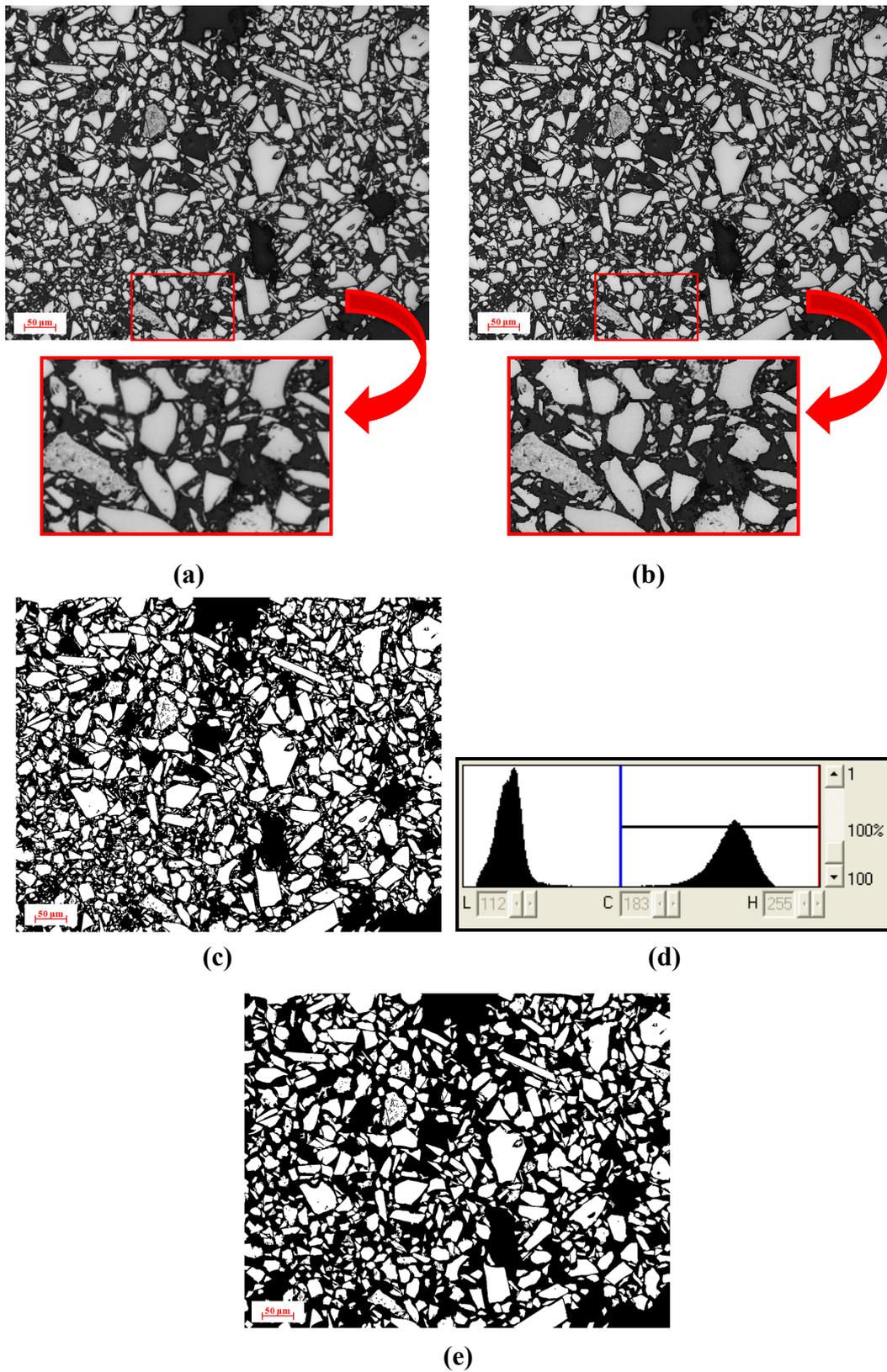


Figura 52 – (a) Imagem original; (b) imagem após aplicação do *Delineate*; (c) imagem segmentada; (d) histograma; (e) imagem resultante da aplicação do *Scrap*, com objetos menores do que 100 pixels eliminados.

A imagem segmentada nem sempre apresenta resultados satisfatórios para que as medidas sejam feitas sobre ela. Assim, para a eliminação de objetos muito pequenos, que podem nem ser as partículas de interesse, aplicou-se a função *Scrap*. Os objetos menores do que 100 pixels foram eliminados. A imagem resultante da aplicação do *Scrap* pode ser visualizada na Figura 52-e.

A partir desta imagem, na qual estão presentes somente as partículas de hematita, os atributos foram extraídos.

6.2.2.2. Parâmetros II

O grupo II seguiu a sequência mostrada na Figura 53.

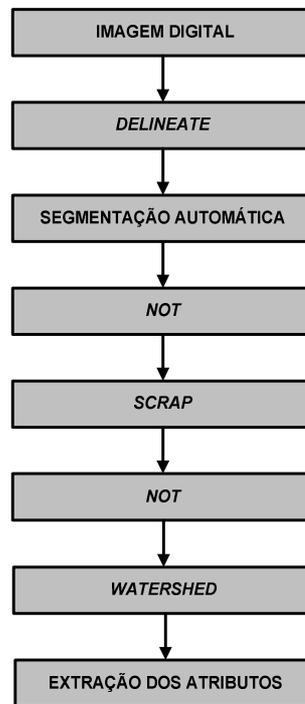


Figura 53 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo II

Assim como as imagens do grupo I, as imagens do grupo II passaram pela etapa de pré-processamento com a aplicação da função *Delineate*. Em seguida, com um histograma melhor comportado, foi feita a segmentação da imagem. Na imagem binária resultante, aplicou-se um *NOT* para a inversão da imagem. A imagem invertida resultante pode ser observada na Figura 54. Na imagem invertida, aplicou-se um *Scrap*, para a eliminação de objetos menores do que 100 pixels. Da imagem resultante, aplicou-se um *NOT* para a inversão da imagem

novamente. Com a imagem binária resultante, na qual os pixels brancos são referentes às partículas e os pixels pretos ao fundo e objetos de não-interesse, aplicou-se o *Watersheds*. O *Watersheds* é utilizado para a separação dos objetos, separando, desta forma, partículas que se encontravam conectadas.

Todo esse procedimento de inversão de imagem e eliminação de objetos pequenos, neste caso, poros muito pequenos, foi necessário para evitar que as partículas fossem “quebradas” pelo *Watersheds*. Quando há um pequeno buraco no interior da partícula, o *Watersheds* pode separá-la em duas ou mais partes erroneamente.

A imagem resultante da aplicação do *Watersheds* pode ser visualizada na Figura 55-b. Note que as partículas, que antes estavam conectadas (Figura 55-a), foram separadas.

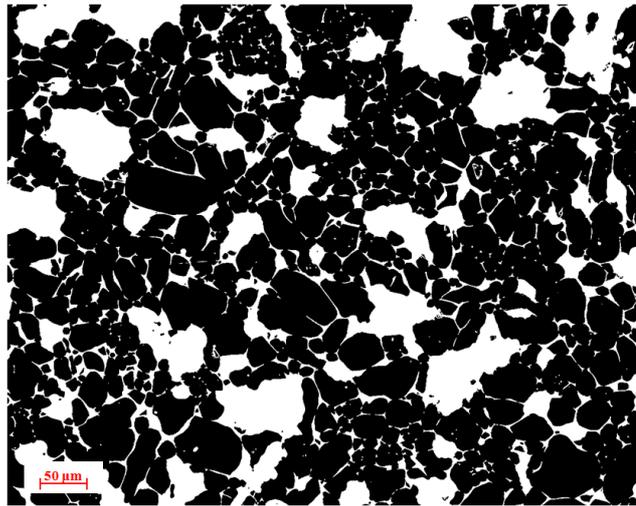


Figura 54 – Imagem resultante da aplicação do *NOT*

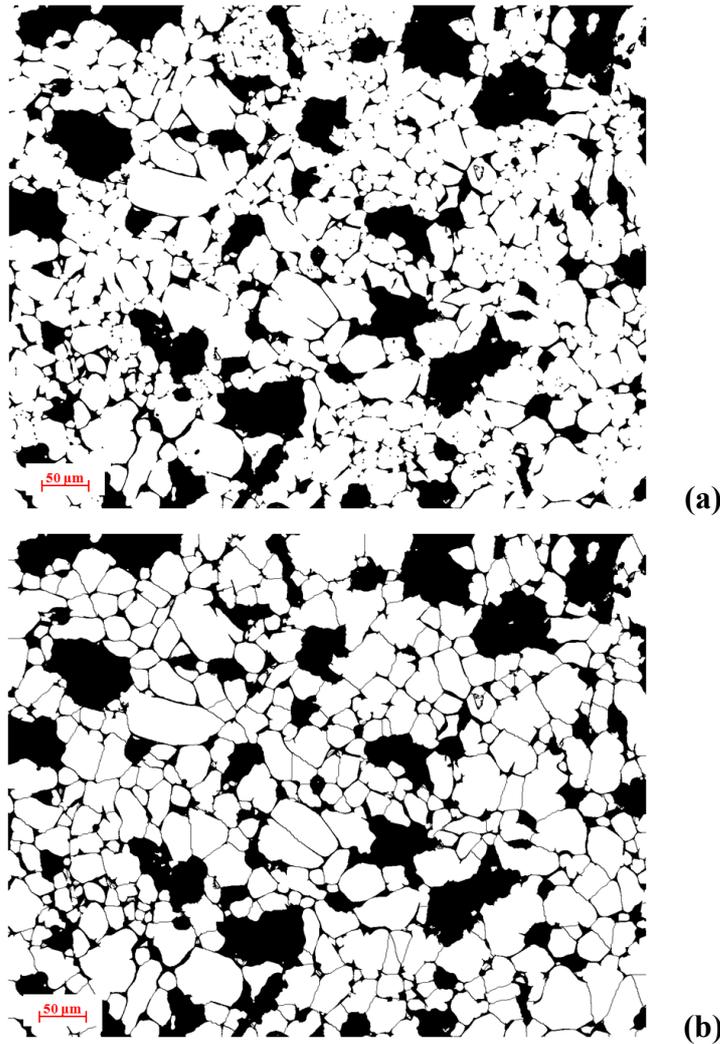


Figura 55 – (a) Imagem anterior à aplicação do *Watersheds*; (b) imagem resultante da aplicação do *Watersheds*

Com a imagem contendo as partículas desconectadas entre si, os parâmetros desejados foram extraídos.

6.2.2.3. Parâmetros III

As medidas dos parâmetros do grupo III foram feitas em imagens sem nenhum processamento, isto é, a extração dos atributos foi feita nas imagens originais. Foi utilizada como máscara uma imagem branca do mesmo tamanho das imagens das quais seriam obtidas as medidas. Dessa forma, determinou-se que os parâmetros de textura fossem medidos em todo o campo da imagem e não só nas partículas.



Figura 56 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo III

6.2.2.4. Parâmetros IV

O grupo IV seguiu a sequência de processamento mostrada na Figura 57. Como se referem às medidas de poros pequenos, as imagens seguiram a sequência inicial parecida com as dos outros grupos, com a aplicação de um *Delineate* e, em seguida, a segmentação das regiões de interesse (as partículas). Aplicou-se um *NOT* na imagem segmentada, obtendo-se a imagem invertida. Como neste caso somente os poros pequenos eram desejados, aplicou-se um *Scrap* para a eliminação de objetos (partículas) maiores do que 3000 pixels. A imagem final para a obtenção dos atributos desejados pode ser vista na Figura 58.

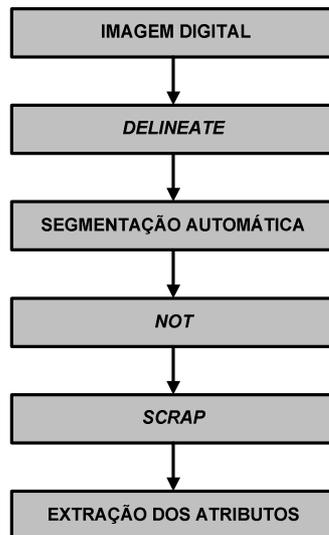


Figura 57 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo IV

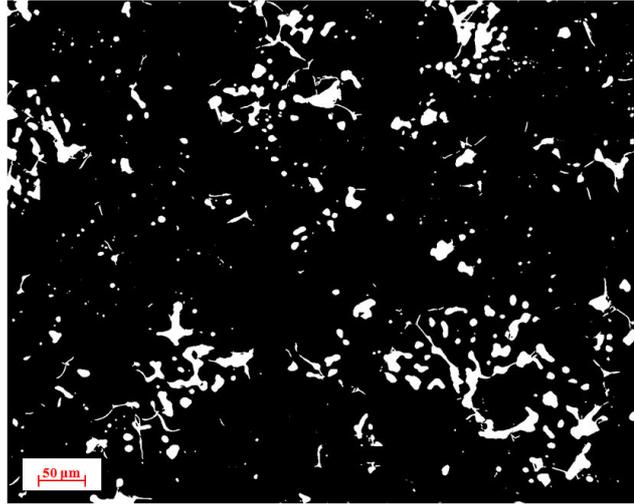


Figura 58 – Imagem de poros pequenos

6.2.2.5. Parâmetros V

O grupo V seguiu a rotina de processamento apresentada na Figura 59. Os parâmetros deste grupo são medidas referentes aos poros totais. Para isso, as imagens seguiram o processamento inicial utilizado pela maioria dos grupos aqui descritos, que consiste na aplicação da função de realce de bordas *Delineate* e na posterior segmentação desta imagem resultante. Inverteu-se a imagem segmentada através de um *NOT* e as medidas foram feitas sobre ela.

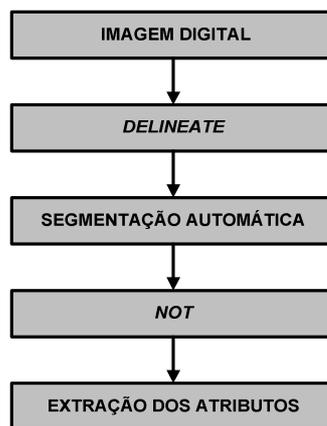


Figura 59 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo V

6.2.2.6. Parâmetros VI

As imagens do grupo VI, apesar de serem utilizadas para a extração de medidas de textura, possuem um processamento diferenciado do utilizado no grupo III.

No presente grupo, as medidas foram feitas em imagens polarizadas. As imagens polarizadas de pelotas de minério de ferro são bem diferentes das obtidas em campo claro. Os cristais de hematita são classificados como materiais birrefringentes e, em virtude da estrutura cristalina, todos os materiais birrefringentes são anisotrópicos. Diz-se que um cristal é anisotrópico quando a velocidade da luz depende da direção de propagação através do cristal. Quando a luz incide sob um ângulo diferente de zero em relação ao eixo ótico, os raios se propagam em direções distintas e emergem separados no espaço. Dependendo do atraso, os raios podem interferir de forma construtiva ou destrutiva. Daí a diferença de tonalidade entre os grãos das partículas de hematita, de orientações cristalográficas diferentes, nas imagens polarizadas.

Uma grande variação de tonalidade na imagem polarizada acaba gerando resultados parecidos para todos os tipos de grau de maturação. Pensando nisso, as medidas foram feitas em imagens nas quais todos os objetos diferentes das partículas receberam valor de pixel igual a 0 (preto). Para isso, as imagens passaram pela sequência de processamento apresentada na Figura 60.

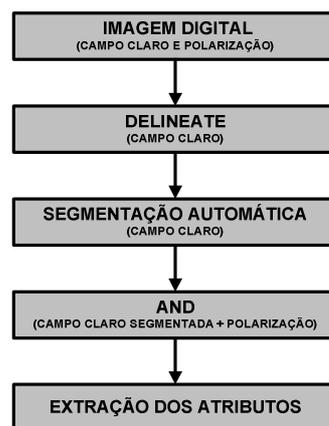


Figura 60 – Fluxograma da rotina de extração dos atributos do grupo VI

A única função diferente das demais utilizadas nos outros grupos é a de interseção entre as imagens, denominada *AND*. A imagem resultante da aplicação do *AND*, na qual a extração de atributos foi feita, é mostrada na Figura 61.

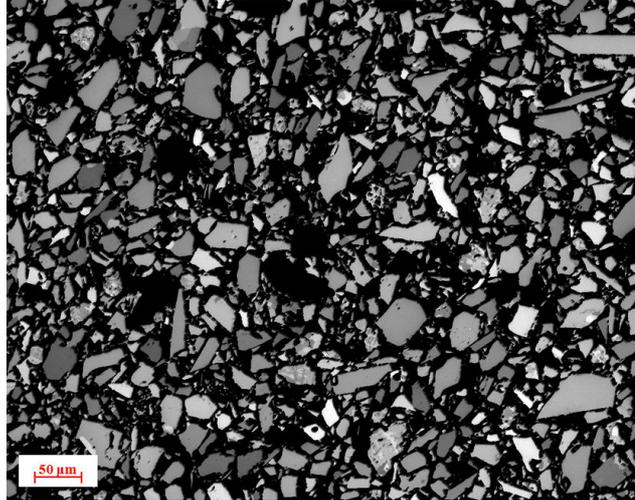


Figura 61 – Imagem resultante da aplicação do *AND* (Imagem final para extração dos atributos)

Vale ressaltar que as medidas deste grupo de parâmetros foram feitas no banco de imagens contendo todas as 915 adquiridas e inteiras (sem a geração dos quadrantes).

6.2.3. Escolha dos Atributos

A partir dos processamentos realizados nas imagens de partículas, poros e poros pequenos, foram extraídos 58 parâmetros no total. Em resumo, os atributos extraídos foram:

- **Partículas:**
 - Contagem de partículas conectadas (CPC), sem a aplicação de *Watersheds*;
 - Contagem de partículas desconectadas (CPD), com a aplicação de *Watersheds*;
 - Razão de número de partículas (CPC/CPD);
 - Fração de área;

- Interceptos: número de interceptos, soma das cordas, média de todas as cordas;
 - Média dos tons de cinza – Campo Claro;
 - Média dos tons de cinza – Polarização;
 - Desvio padrão dos tons de cinza – Campo Claro;
 - Desvio padrão dos tons de cinza – Polarização;
 - Haralick 1 a 11 – Campo Claro;
 - Haralick 1 a 11 – Polarização;
 - Área;
 - Perímetro;
 - DCE;
 - FFC₁;
 - FFC₂;
 - RA;
 - Conv₁;
 - Conv₂.
- **Poros pequenos:**
 - Fração de área;
 - Interceptos: número de interceptos, soma das cordas, média de todas as cordas;
 - Área;
 - Perímetro;
 - DCE;
 - FFC₁;
 - FFC₂;
 - RA;
 - Conv₁;
 - Conv₂;
 - MR;
 - BF.

- **Poros:**
 - Interceptos: número de interceptos, soma das cordas, média de todas as cordas;

As rotinas utilizadas para a extração dos atributos realizada no *software* KS400 encontram-se no anexo.

6.2.3.1. Redução de Dimensionalidade

Como a quantidade de atributos é muito grande, foram testados diversos grupos deles na classificação.

A redução de dimensionalidade consiste na seleção de atributos considerados mais relevantes ou na combinação de variáveis redundantes em outras variáveis, referidas como componentes, para a obtenção de um conjunto com dimensões menores. A distância entre os pontos representados pelos componentes no sub-espaco de dimensão mais baixa deve corresponder tanto quanto possível às dissimilaridades entre os pontos no espaco dimensional original.

Neste trabalho, três técnicas de redução de dimensionalidade foram utilizadas: Busca exaustiva do conjunto com a melhor taxa de acerto, Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Discriminante Linear de Fisher (LDA). Todos estes métodos foram realizados a partir de rotinas implementadas em ambiente Matlab.

Conforme explicado na seção 5.6.1.2, a rotina de busca exaustiva faz inúmeras combinações de parâmetros e seleciona o conjunto com a melhor taxa de acerto. Assim, buscou-se a melhor taxa de acerto para cada combinação contendo diferentes números de parâmetros. Já os métodos de PCA e de LDA consistem na transformação linear dos dados em novos conjuntos de dimensões menores.

Para a aplicação do LDA, fez-se necessária a utilização do método *Whitening* sobre os dados. O *Whitening* transforma variáveis aleatórias em variáveis não-correlacionadas.

A descorrelação é uma forma fraca de independência. Duas variáveis y_1 e y_2 são não-correlacionadas se a sua covariância, dada pela equação abaixo, for zero:

$$\text{cov}(y_1, y_2) = E(y_1 y_2) - [E(y_1)E(y_2)] = 0 \quad (29)$$

Onde $E()$ é o operador do valor esperado.

No entanto, o fato das variáveis terem covariância igual a zero não implica em serem variáveis independentes.

O *Whitening* é uma propriedade mais forte do que a descorrelação. Um vetor y aleatório e com média zero é considerado *White* se os seus componentes são não-correlacionados e têm variância igual a 1. Dessa forma, as matrizes de covariância e de correlação de y correspondem à matriz identidade.

A transformação *Whitening* é calculada pela seguinte equação:

$$A_w = \Phi \Lambda^{-1/2} \quad (30)$$

Onde:

Φ é a matriz, na qual as colunas são os autovetores ortonormais da matriz de covariância Σ ;

Λ é a matriz diagonal dos autovalores correspondentes.

6.2.4. Classificação

A partir dos grupos de atributos, realizou-se a classificação. Para cada grupo de parâmetros obtido pelos métodos de redução de dimensionalidade, foi feita a autovalidação e a validação cruzada. A fim de também avaliar os classificadores, foram testados 3 tipos diferentes: *Quadrático*, *Mahalanobis* e *Linear*. Os classificadores *Quadrático* e *Linear* são classificadores do tipo *bayesianos* e o *Mahalanobis*, conforme o próprio nome sugere, é um *Classificador de Distância de Mahalanobis*.

As rotinas utilizadas para a redução de dimensionalidade por meio da busca exaustiva da melhor taxa de acerto, para as autovalidações e para as validações cruzadas encontram-se no anexo.