

4

Materiais e Métodos

Este capítulo descreve detalhadamente os procedimentos experimentais, as técnicas, os materiais e os equipamentos utilizados na realização deste trabalho.

4.1. Seleção e Preparação de Amostras

Com o fim de levar a cabo o presente trabalho, a Vale forneceu as pelotas de minério de ferro empregadas no alto-forno, que em nosso caso foi o material de estudo. Estas amostras foram obtidas a partir de finos de minério de ferro (*pellet feed*) provenientes das minas de Carajás, no estado do Pará, e aglomeradas na usina de pelotização da Vale em Vitória, no estado do Espírito Santo.

As pelotas separadas para a análise por microscopia foram cortadas ao meio ficando exposta sua estrutura interna no seu diâmetro máximo, e em seguida embutidas em resina epóxi. No processo de embutimento, a resina foi vertida dentro dos moldes com as frações de minério de ferro. As seções prontas foram deixadas em temperatura ambiente durante 2 ou 3 dias, tempo de cura.

Após a cura, as amostras foram retiradas dos moldes para serem desbastadas e polidas. O processo de desbaste começou com um disco metálico com partículas de diamante de 70 μm , passando, pelos de granulação 15 e 6 μm . Este desbaste foi realizado com água durante 2 minutos, na primeira granulação e durante 4 minutos nas duas últimas [22].

Quando terminado o processo de desbaste, as amostras foram levadas ao banho ultrassônico para retirar possíveis resíduos, evitando arranhá-las durante o polimento. Posteriormente as superfícies planas foram cuidadosamente polidas com a utilização de panos e suspensões diamantadas de 3 e 1 μm por aproximadamente 1h cada, em uma politriz automática (Figura 4-1). Este procedimento de polimento das amostras foi realizado no Setor de Caracterização Tecnológica (SCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

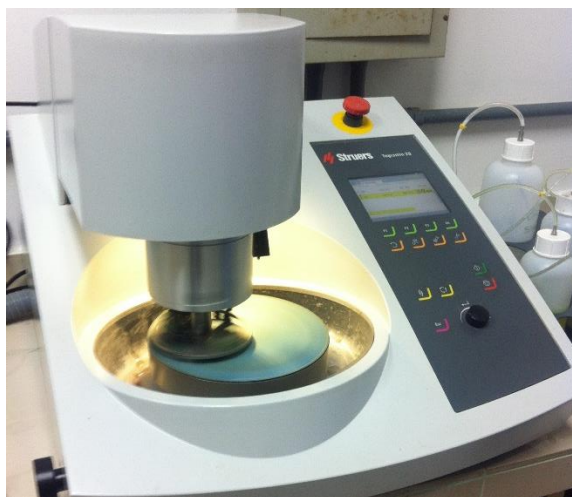


Figura 4-1- Politriz marca Struers Tegramin 2.0.

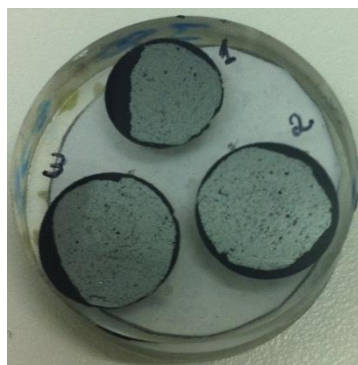


Figura 4-2 – Amostra de três pelotas de minério de ferro embutidas.

Finalmente as amostras obtidas, com diâmetro de 30 mm apresentam 3 pelotas diferentes embutidas, como mostrado na Figura 4-2. Assim, é possível analisar as amostras por microscopia, tanto ótica quanto eletrônica.

4.2. Procedimentos Experimentais

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em duas etapas principais: aquisição de imagens no MO e no MEV e análise digital das imagens obtidas.

4.2.1. Aquisição de Imagens ao Microscópio Ótico

Foi usado um microscópio ótico (AxioImager.M2m) da Carl Zeiss (Figura 4-3) para a captura das imagens. Este microscópio está equipado com uma câmera digital AxioCam MRc5 de resolução máxima 2584 X 1936 pixels, e é controlado

mediante o software AxioVision 4.9.1, do Laboratório de Microscopia Digital (LMD) no DEQM da PUC-Rio.

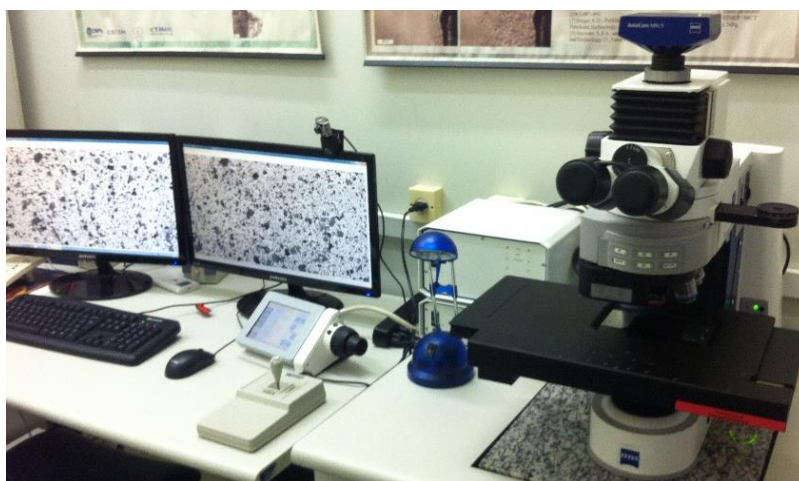


Figura 4-3 – Microscópio ótico marca Zeiss AxioImager.M2m.

Todas as imagens foram capturadas empregando a lente objetiva de 20X (EC Epiplan 20X/0,40 HD M27), corresponde a uma resolução de $0,53 \mu\text{m}/\text{pixel}$, no modo RGB, com uma quantização de 24 bits e resolução de câmera 1292 X 968 pixels.

Como primeira medida, antes de iniciar o processo de captura das imagens, foi necessário executar alguns procedimentos prévios, visando à obtenção de imagens com as mesmas condições de captura, durante todo o processo, e assegurando a reprodutibilidade dos experimentos. Assim, todas as imagens foram capturadas no modo de campo claro (*Bright Field*), e a intensidade da iluminação foi mantida constante durante toda a aquisição das imagens pelo controle digital direto da tensão da lâmpada.

O tempo de exposição (*Exposure*) e o equilíbrio de branco (*White Balance*) foram ajustados em um campo representativo de cada amostra e foram deixados constantes em todos os campos posteriores de cada uma delas. No caso do tempo de exposição foi mantido em 14 ms. Devido ao grande tamanho dos arquivos gerados (aproximadamente 2 GB), decidiu-se não trabalhar com aumentos maiores, já que apesar de fornecerem uma melhor resolução, isso iria dificultar o processamento destas imagens.

Finalmente, na correção do fundo, a fim de eliminar problemas de iluminação e sujeiras no caminho ótico, foi usada uma técnica que emprega uma amostra padrão

de carboneto de silício (SiC). Utilizando esta amostra é gerada uma imagem de fundo, para a lente objetiva de 20X, a qual é subtraída de cada imagem capturada em um processo automático de correção de fundo.

4.2.1.1.Campo Estendido (mosaico)

A integração do controle do microscópio ao computador confere maior velocidade e praticidade ao processo de captura. Este tipo de aquisição permite a captura de inúmeras imagens, de forma automática e reprodutível, cobrindo uma grande região da amostra e reduzindo a ocorrência de erros sistemáticos por parte do operador, como a repetição e a sobreposição de campos [20].

Na Figura 4-4 se observa o procedimento de captura automática empregando a ferramenta *MosaiX* (Figura 4-4-a), disponível no software AxioVision. Esta ferramenta controla o deslocamento motorizado da platina nas direções x, y e z, criando uma imagem pela concatenação dos campos capturados. A técnica é conhecida como Mosaico ou Campo Estendido e tem como objetivo cobrir grandes regiões de imagens nas quais as estruturas relevantes são maiores do que o campo a uma dada magnificação.

O procedimento de captura do mosaico se baseia no deslocamento da platina no plano (x,y) conforme mostrado na Figura 4-4-b, e a cada posição capturar uma imagem. Para que isto faça sentido, a amostra deve estar em foco em cada coordenada (x,y), selecionando a opção *Autofocus* (Figura 4-4-a). Não obstante, nem sempre é factível fazer autofocus em cada imagem pelo tempo excessivo que demoraria o processo.

Para agilizar este processo existe a opção de alternar o autofocus entre campos, tão espaçados quanto possível, levando em consideração a relação tempo-qualidade. Outra estratégia usada para agilizar o processo de captura automática de campos é o uso de meandros para poupar a platina de movimentos desnecessários [20].

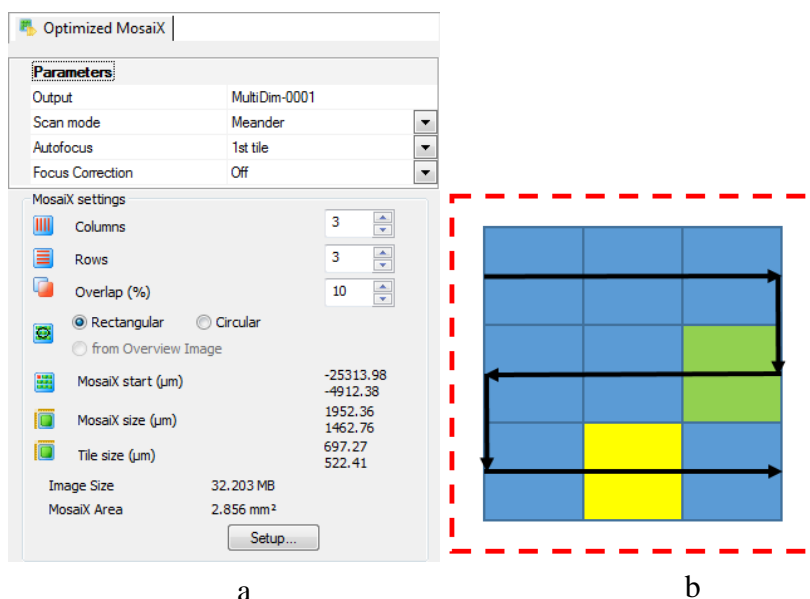


Figura 4-4 – a) Interface do comando MosaiX; b) Procedimento de varredura para captura das imagens individuais.

Este problema de alinhamento pode ser corrigido se, durante a captura, os “ladrilhos” (campos capturados nas posições x,y) forem parcialmente superpostos aos vizinhos e posteriormente alinhados (Figura 4-5-b) usando a função *Stitching*, do software AxioVision. A função *Stitching* nada mais é do que uma técnica de registro que faz um alinhamento automático dos campos previamente capturados.

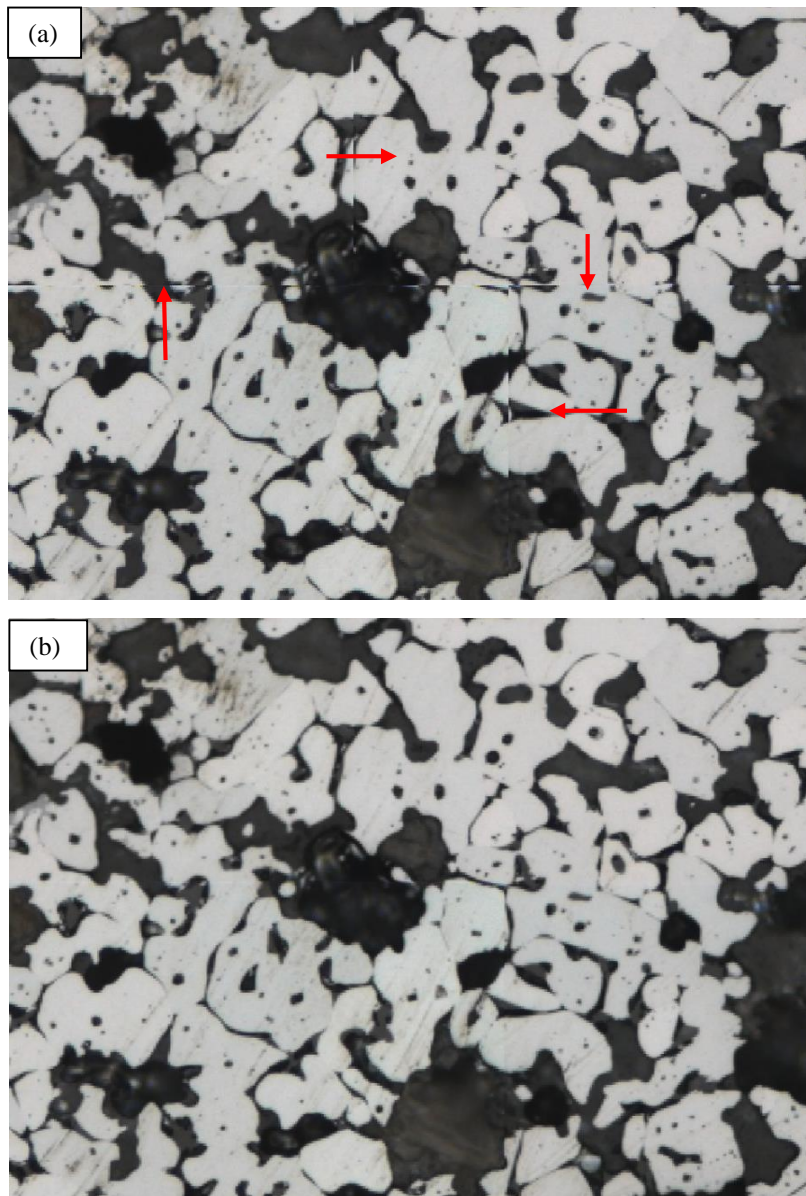


Figura 4-5 – Exemplo de captura de um mosaico 2X2 a) Visão ampliada de uma região mostrando o alinhamento imperfeito (setas em vermelho); b) Mesma região com alinhamento utilizando a opção *Stitching*.

4.2.2. Aquisição de Imagens ao MEV

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra, alguns elétrons são absorvidos pela amostra que deve conduzi-los para a terra, por isso, é preciso que as amostras sejam condutoras. Caso isto não ocorra, é possível torná-las condutoras através de vários processos físicos como evaporação ou a deposição de íons (*sputtering*). Outro motivo para o recobrimento das amostras, é que as camadas depositadas podem melhorar o nível de emissão de elétrons, pois emitem mais elétrons que o material da amostra, facilitando a construção da imagem [26].

No recobrimento a partir da evaporação, que foi o método empregado neste trabalho, normalmente é utilizado o carbono. Para este procedimento utiliza-se a câmara de uma metalizadora à qual é acoplado um sistema para aquecimento das fibras de carbono (Figura 4-6).



Figura 4-6 – Equipamento utilizado para recobrimento com carbono ou deposição metálica sobre amostras não condutoras.

Após o devido recobrimento com carbono para tornar a amostra condutora (Figura 4-7), o primeiro passo da etapa no MEV é a localização do centro da amostra, referência para as posições dos campos adquiridos ao microscópio ótico. Isto pode ser feito manualmente, obtendo-se as posições das extremidades da amostra e calculando-se a posição de seu centro.

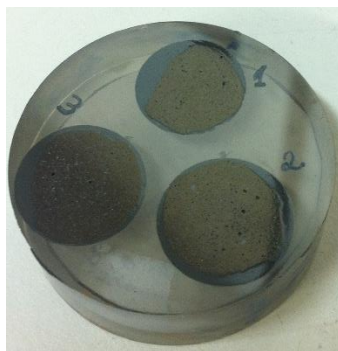


Figura 4-7 – Amostra após recobrimento com carbono.

O ajuste do foco é o segundo passo. Basta acertar o foco no centro da amostra e mantê-lo fixo em todos os campos. Contudo, cabe ressaltar que, ao invés de ajustar o foco através da distância de trabalho, como comumente é feito, deve-se fazê-lo definindo uma posição z e mantendo a distância de trabalho constante. Este procedimento pouco convencional é empregado, pois a fixação da distância de trabalho tem implicações na etapa de registro, conforme abordado mais adiante.

O terceiro passo é realizar um ajuste grosseiro, visual, da rotação. Mesmo tendo-se o cuidado de colocar a amostra na mesma posição no microscópio óptico e no MEV, costuma haver alguns poucos graus de rotação entre as imagens obtidas em um e em outro. Assim, observando-se a imagem do campo central da amostra adquirida ao microscópio óptico, ajusta-se visualmente a rotação na platina do MEV. Este ajuste grosseiro acelera a etapa de registro das imagens. Finalmente o microscópio começa a capturar uma imagem para cada campo, gerando assim uma série de imagens correspondentes a um mosaico da amostra completa.

O MEV utilizado foi um FEI Quanta 400, pertencente ao CETEM. Este microscópio pode ser observado na Figura 4-8.

As amostras foram analisadas no MEV através de imagens formadas pelo detector de elétrons retroespalhados com 25 kV de tensão de aceleração.



Figura 4-8 – Microscópio Eletrônico de Varredura Marca FEI Quanta 400.

4.2.3. Aquisição de imagens no MicroCT

A parte realizada empregando a técnica MicroCT apresenta uma etapa diferente das anteriores, já que foi utilizada uma amostra diferente para ser analisada e comparada mediante as três técnicas. Assim, foi utilizada uma pelota completa de minério de ferro fornecida pela Vale a qual foi capturada por microtomografia de raios X. Foi utilizado um tomógrafo marca Xradia 510 Versa (Figura 4-9) com uma lente objetiva de 0,4X e tamanho de pixel de 8 μ m.



Figura 4-9 – Microtomografo marca Xradia 510 Versa

A pelota foi colada em uma haste de alumínio que serviu como eixo de referência (eixo z) e eixo de giro. A partir de inúmeras projeções obtidas com a rotação da amostra frente ao feixe de raios-x, um algoritmo de reconstrução gera uma sequência de camadas 2D que formam uma imagem 3D.

Para poder comparar estas imagens com as obtidas por MO e MEV, desenvolveu-se o seguinte procedimento:

- A pelota foi cuidadosamente cortada em um plano aproximadamente equatorial ortogonal ao eixo de giro (eixo z).
- Em seguida foi embutida e polida para observação por MO e posteriormente metalizada para observação por MEV (Figura 4-10).
- As imagens em mosaico MO e MEV foram capturadas, como descrito anteriormente.
- Como as imagens de MO e MEV tinham dimensões, em pixels, muito maiores do que as de MicroCT, elas foram subamostradas para gerar imagens com dimensões idênticas.
- Uma rotina de correlação desenvolvida em Matlab comparou a imagem de MEV com todas as camadas da tomografia, encontrando a camada mais semelhante. Ainda que semelhante, esta imagem ainda corresponde a um plano que pode estar levemente inclinado em relação à camada tomográfica, devido a imprecisões do corte e efeitos do polimento.
- Finalmente, utilizou-se rotina denominada BUnwarpJ, disponível no software FIJI, para registrar a camada de MicroCT com a imagem de MEV.

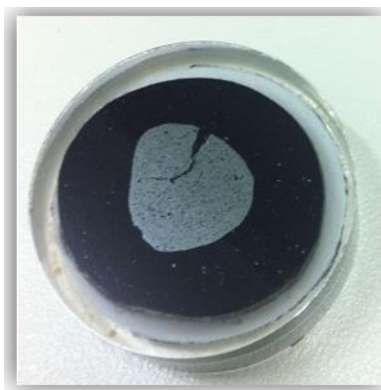


Figura 4-10 - Amostra de uma pelota de minério de ferro embutida.

Finalmente foram segmentados os poros em cada uma das 3 imagens registradas (MO, MEV e MicroCT) e compararam-se as medidas de porosidade em cada uma e usando a correlação MO+MEV.

4.2.4. Processamento e Análise Digital de Imagens

A área de Processamento Digital de Imagens (PDI) envolve uma série de operações matemáticas que buscam modificar o valor dos pixels da imagem original. O objetivo disto é corrigir defeitos da aquisição e realçar detalhes que permitam obter melhoras na visualização [21].

A parte da Análise Digital de Imagens (ADI) baseia-se na extração e análise quantitativa dos dados, sendo possível a medição de regiões, partículas e objetos identificados a partir das imagens digitais, muitas vezes difícil de ser executadas visualmente. O termo PADI, comumente utilizado, engloba as duas áreas anteriormente mencionadas numa expressão geral [7, 20].

Nesta etapa utilizou-se o software livre *Image-J*, com o qual se processaram todas as imagens deste trabalho. Os principais passos da sequência completa de PADI são mostrados na Figura 4-11.

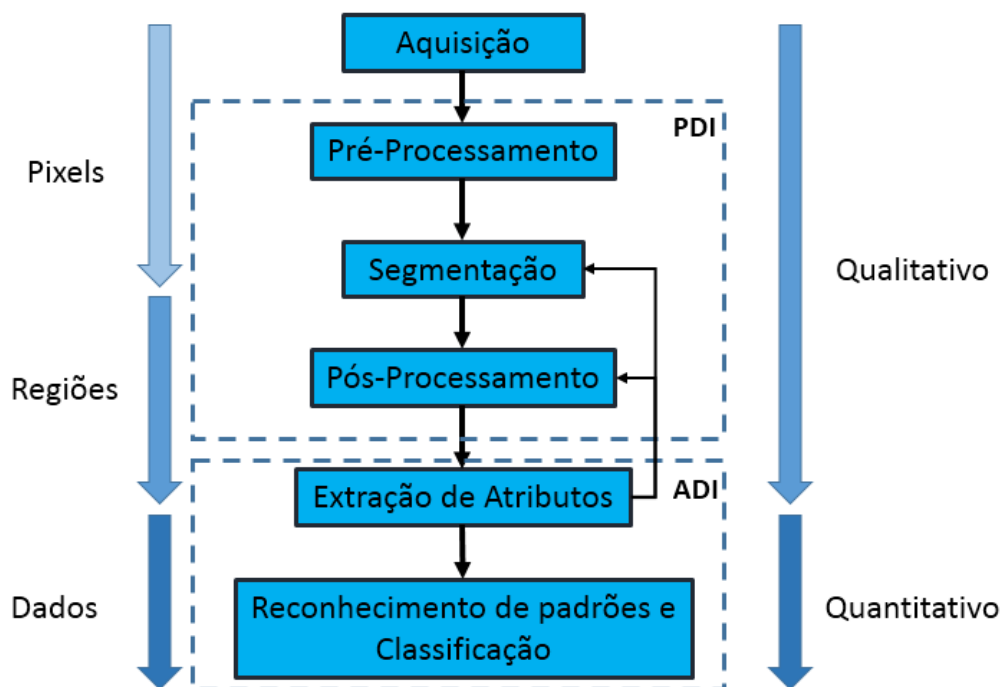


Figura 4-11 – Sequência de PADI [7, 21].

4.2.4.1. Pré-Processamento

Uma vez feita a captura das imagens no MO e no MEV foi realizada a etapa de pré-processamento. Esta etapa visa preparar a imagem para que na etapa de segmentação os resultados sejam os melhores, e para isto é preciso que as imagens estejam com o mínimo de imperfeições [7].

No pré-processamento são características as correções de brilho e contraste, assim como correção de iluminação, redução de ruídos e realce de bordas [21]. Sempre que possível, deve-se buscar corrigir estes defeitos na etapa de aquisição das imagens, seguindo um procedimento cuidadoso para evitar este tipo de problemas.

No caso específico deste trabalho, não foi preciso realizar nenhuma das correções anteriormente citadas. Isto é devido a que o processo de captura das imagens, tanto no MO quanto no MEV, foi realizado nas melhores condições, permitindo obter imagens com boa iluminação e o mínimo ruído.

Contudo, a fim de correlacionar as imagens capturadas mediante as duas técnicas, foi necessário fazer um registro das imagens empregando o software “Image-J”. Como as imagens obtidas no MEV se encontram com uma orientação diferente a das imagens capturadas no microscópio ótico foi feita uma operação de “Flip” ou giro das imagens para deixar as duas na mesma orientação.

Para realizar o registro é preciso obter um *stack* das duas imagens, o qual somente pode ser obtido tendo as mesmas com o mesmo número de pixels. O ajuste no número de pixels foi realizado usando a opção “Convert to largest scale” localizado dentro do comando “Images to Stack”. Esta opção realiza uma interpolação dos pixels existentes na imagem com menor número de pixels para aumentar este número e assim igualar as duas imagens, baseado na imagem com maior número de pixels como referência, neste caso a imagem do MO.

Finalmente, tendo as duas imagens com a mesma orientação e o mesmo número de pixels dentro do mesmo stack, foi usada a função de registro “Linear Stack Alignment With SIFT” ou LSA, a qual emprega a transformação “Affine” para identificar objetos com características comuns nas duas imagens e os utiliza para co-localizar as imagens [27].

Após o registro das imagens, é feita outra operação de pré-processamento conhecida como “delineamento” ou *delineate*, a qual tem como função realçar

bordas na imagem. Esta etapa é crucial para poder realizar uma boa segmentação. Esta operação transforma as transições suaves entre pixels em transições abruptas deixando assim as bordas mais definidas [7].

A Figura 4-12 apresenta a imagem original e após a aplicação do filtro *delineate*. É possível observar a diferença entre as duas imagens já que depois de realizar o delineamento da imagem (Figura 4-12-b), as bordas foram realçadas dando a sensação de maior nitidez. Observando os histogramas das imagens pode-se ver como o vale, entre os principais picos do histograma fica mais baixo na imagem delineada (Figura 4-12-b) diminuindo o número de pixels intermediários.

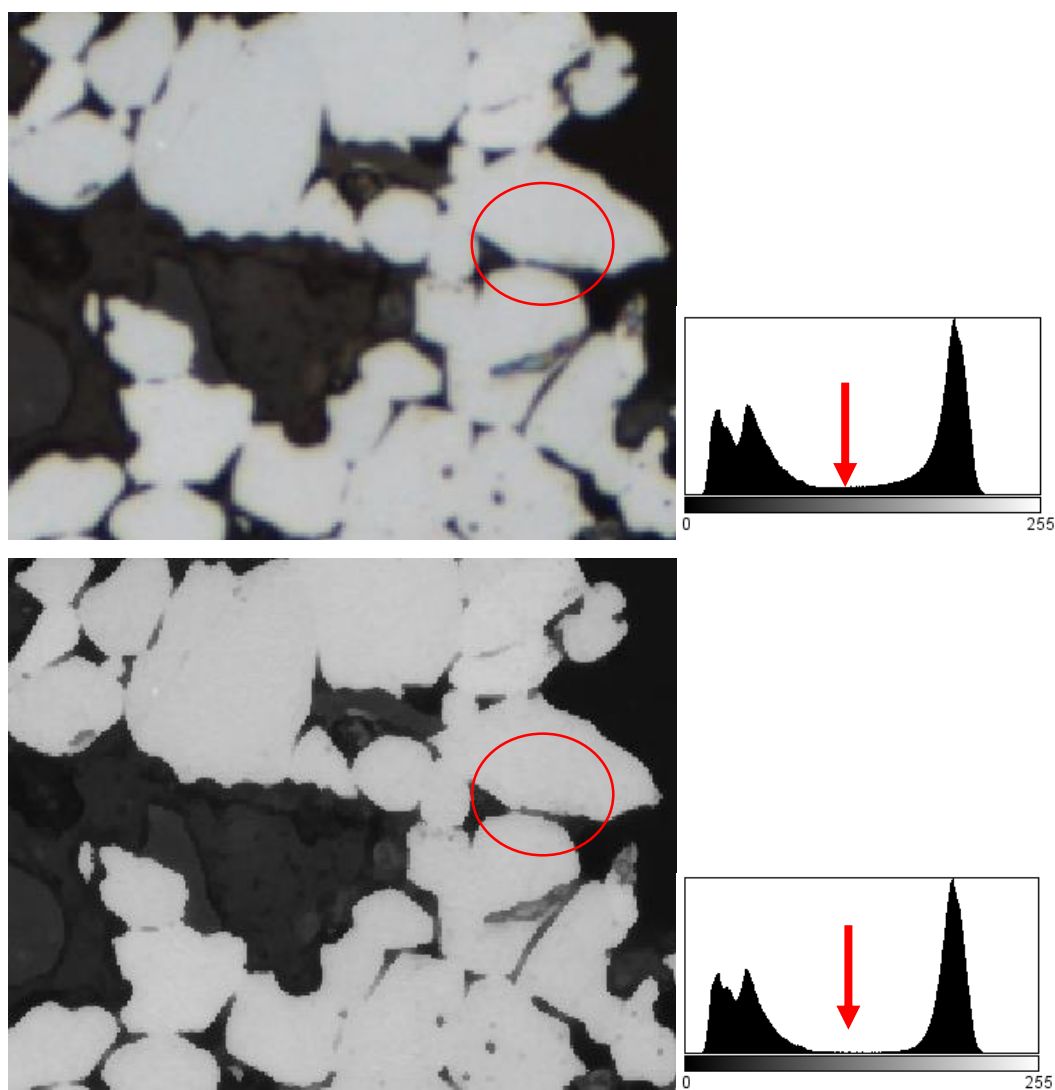


Figura 4-12- Aplicação do filtro *delineate*. a) Região ampliada de uma imagem MO e seu respectivo histograma; b) Imagem MO delineada e seu respectivo histograma.

4.2.4.2. Segmentação

A segmentação é uma etapa fundamental dentro do processamento digital de imagens, pois é aqui que é obtida a imagem da qual vai ser extraída a informação de interesse. O objetivo da segmentação é reconhecer objetos formados pelo contínuo agrupamento de pixels na imagem e separá-los uns dos outros e do fundo [28].

Como resultado da segmentação é obtida uma imagem binária na qual os pixels pretos (indicados com valor 0) indicam o fundo e os pixels brancos (indicados com o valor 1) representam os objetos de interesse os quais irão ser medidos segundo o caso [20].

Na Figura 4-13 se observa um exemplo claro de segmentação. Uma imagem de uma região ampliada da pelota de minério de ferro obtida por MEV (Figura 4-13-a) é segmentada gerando uma imagem binária (Figura 4-13-b) na qual as partículas de quartzo são separadas do resto da imagem.

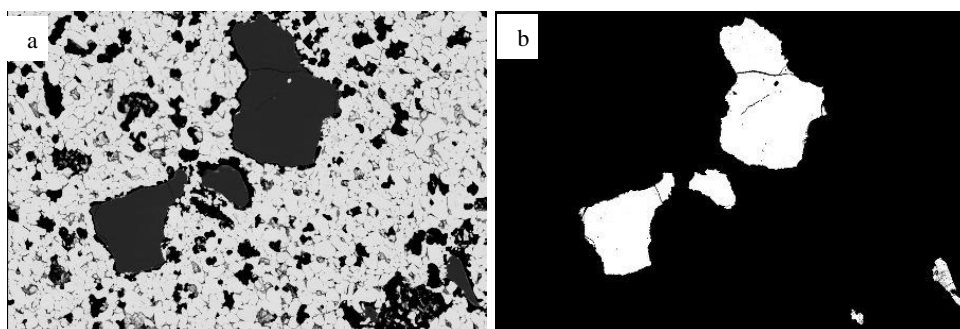


Figura 4-13 – a) Imagem MEV; b) Imagem binária resultado da segmentação das partículas de quartzo na imagem MEV.

No presente trabalho empregou-se um algoritmo de segmentação baseado nos tons de cinza da imagem conhecido como *limiarização* ou *segmentação por faixa tonal*. Este método utiliza os tons de cinza dos pixels para distingui-los, agrupando como objetos todos os pixels contíguos que pertencem a uma mesma faixa tonal delimitada por esses tons de corte selecionados [28]. A seleção dos diferentes limiares foi feita de modo visual a fim de separar cada uma das fases presentes da melhor maneira possível, gerando tantas imagens binárias quanto fases fossem segmentadas na imagem. Encontrou-se que os mesmos tons de cinza não mudavam entre as imagens diferentes de uma mesma técnica mas mudavam quando se empregava outra técnica diferente. Assim os mesmos valores dos tons foram

empregados para segmentar as 3 imagens MEV e outros valores diferentes foram empregados para segmentar as 3 pelotas MO como indica a Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Limiares empregados na segmentação de cada técnica

	MO	MEV
Poros	0 – 47	0 – 32
Quartzo	48 – 94	33 – 49
Silicatos	95 – 173	50 – 185
Hematita	174 - 255	186 – 255

As fases encontradas nas pelotas de minério de ferro analisadas foram: hematita (H), quartzo (Q), silicatos (S) e poros (P). Foram testados os mesmos tons de corte em três imagens correspondentes a três amostras de pelotas de minério diferentes e em todas se obteve uma boa separação das fases presentes.

O histograma da Figura 4-14 é um exemplo da segmentação realizada para separar as quatro fases presentes. Estas fases foram representadas por uma cor característica e em escala logarítmica para facilitar a sua visualização.

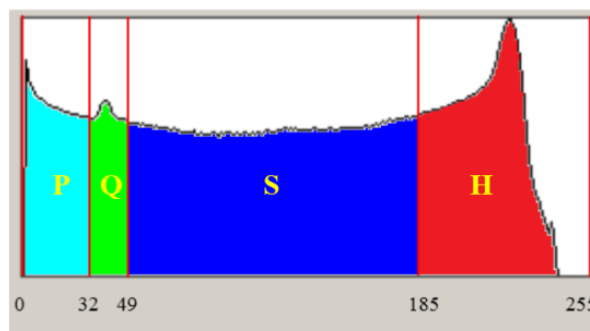


Figura 4-14- Exemplo de limiarização das fases e os diferentes tons de corte no histograma com o eixo vertical em escala logarítmica da imagem MEV.

4.2.4.3. Pós-Processamento

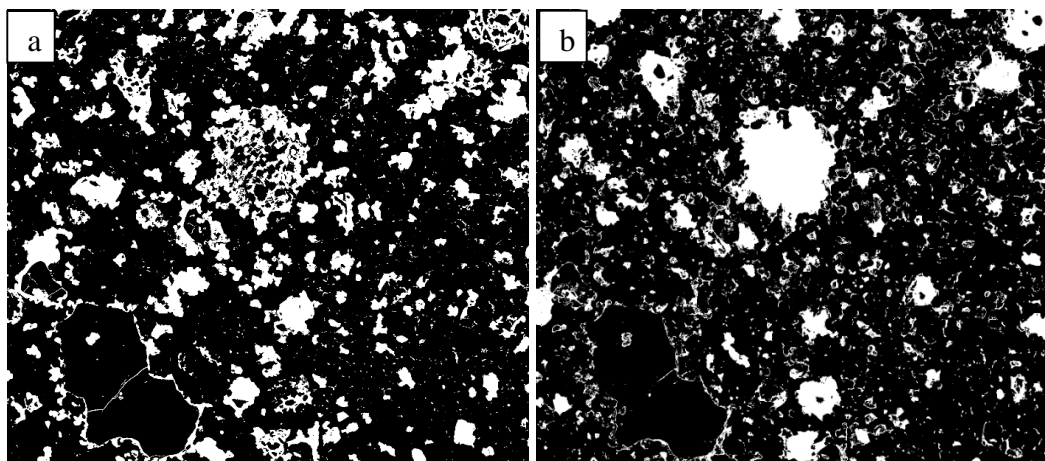
Geralmente é preciso realizar uma etapa após a segmentação a fim de melhorar os resultados obtidos. Esta etapa é conhecida como pós-processamento e envolve uma série de operações lógicas e morfológicas as quais podem agrupar objetos para formar objetos mais complexos ou eliminar objetos que não representam informação significativa [7, 28].

Dentre as principais operações lógicas, as quais são operações pontuais que envolvem mais de uma imagem binária de entrada para gerar uma imagem de saída, destacam-se “*and*” (interseção) e “*or*” (união), a partir das quais pode ser definida qualquer outra [23, 28]. Neste trabalho foram empregadas estas operações.

A operação *and* realiza interseção de duas imagens de entrada gerando uma imagem de saída, na qual os pixels brancos são somente os pixels que eram brancos nas duas imagens de entrada [28]. A operação *or* faz a união de duas imagens gerando uma imagem onde são brancos os pixels que eram brancos em pelo menos uma das imagens de entrada.

Dado que as imagens obtidas por MO e por MEV apresentam contrastes diferentes, é possível observar melhor alguns detalhes em cada uma. O caso da porosidade é um exemplo claro, já que ao observar a imagem da pelota obtida por MEV pode-se observar alguns detalhes nos poros que não são possíveis observar na imagem obtida por MO e vice-versa. Assim, empregando a operação *or* foi possível obter uma imagem de saída que corresponde à união das duas imagens anteriormente mencionadas.

Para isto foram previamente segmentados os poros na imagem do MEV (Figura 4-15-a) e do MO (Figura 4-15-b), utilizando o método de limiarização explicado na seção anterior. Estas duas imagens foram as imagens de entrada que, uma vez aplicada a operação *or*, geraram a imagem de saída correspondente aos poros totais do minério de ferro (Figura 4-15-c).



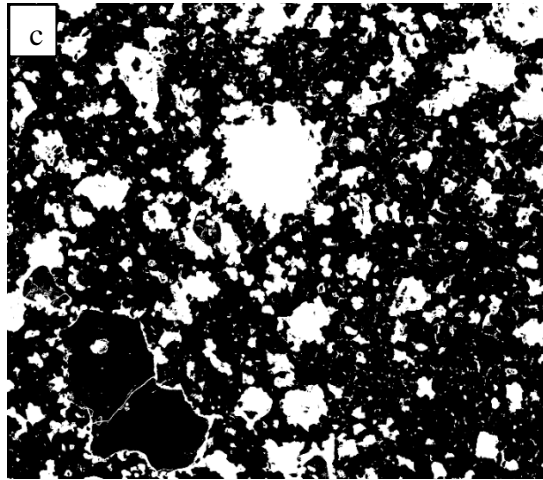


Figura 4-15- Exemplo de aplicação da operação “or”: a) Imagem binária dos poros segmentados a partir da imagem MEV; b) Imagem binária dos poros segmentados a partir de uma imagem MO; c) Imagem binária resultante da união das imagens dos poros segmentados MEV e MO.

De maneira similar às operações lógicas, as operações morfológicas principais são a “dilatação” e a “erosão”, a partir das quais pode ser definida qualquer outra. Na dilatação cada pixel preto na imagem de entrada é invertido na imagem de saída, se houver pelo menos um vizinho branco na região que cobre o elemento estruturante selecionado. Assim, os objetos se dilatam ou aumentam de tamanho podendo se unir ou preencher buracos presentes dentro de outros objetos [28, 29]. Na erosão, opostamente, os objetos são encolhidos sendo que para cada pixel branco na imagem de entrada será invertido na imagem de saída se houver pelo menos um vizinho preto na região abarcada pelo elemento estruturante. Desta forma, objetos podem até desaparecer e os buracos dentro dos objetos aumentar de tamanho [28, 29].

Combinando estas duas operações fundamentais são geradas a operação *open* (abertura) a qual é uma sequência de n ciclos de erosão seguidos de n ciclos de dilatação, e a operação *close* (fechamento) que tem uma sequência inversa à operação de abertura [7]. Neste trabalho foi utilizada a operação *close* para gerar uma máscara binária como se aprecia na Figura 4-16.

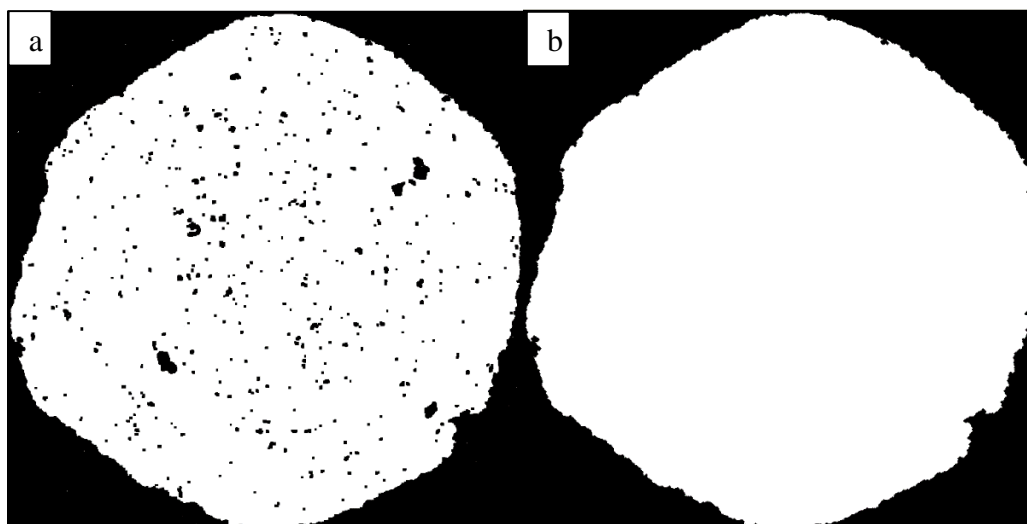


Figura 4-16 – Exemplo de aplicação da operação *close*: a) Imagem MO da pelota começando a aplicação da operação *close*; b) Imagem da pelota MO no final da operação *close + fill holes* (máscara binária).

A Figura 4-16–a apresenta a imagem da pelota segmentada depois de executar a operação de fechamento. Conforme realiza uma série de dilatações começa aumentando os objetos conectando uns com outros e preenchendo buracos internos na pelota seguida por uma série de erosões. Para preencher a pelota completa, foi executada também a operação “*Fill Holes*” a qual como seu nome indica, preenche os buracos que restaram depois de realizar a operação *close*, gerando assim a máscara binária (Figura 4-16-b).

A máscara servirá como fundo para ser interceptada mediante uma operação AND com a imagem obtida no MEV (Figura 4-17-a), previamente delineada e segmentada a parte sólida. Assim foi gerada uma imagem com fundo preto limpo (Figura 4-17-b), dado que a imagem original aparece com pequenas partículas provenientes da resina da amostra que podem parecer “sujeira” e possivelmente afetar os resultados finais.

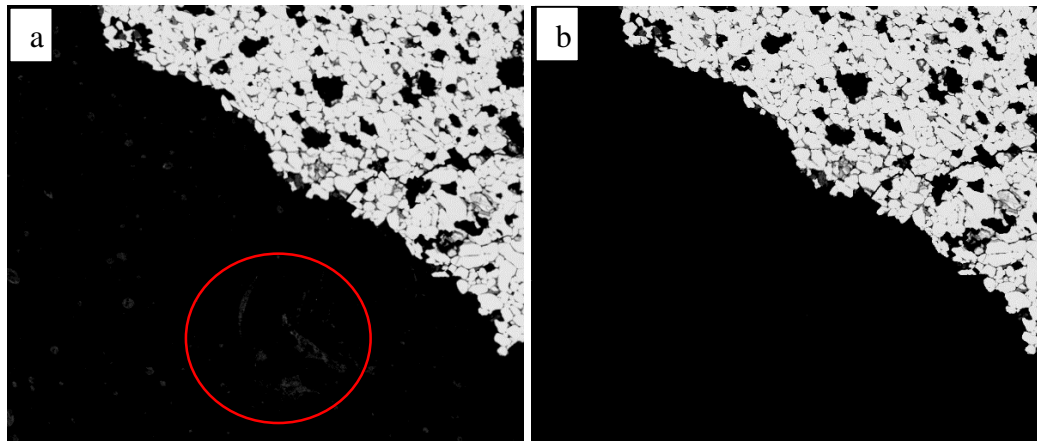


Figura 4-17 – Ampliação de uma região da pelota: a) Imagem MEV b) Imagem interceptada com a máscara binária (fundo limpo).

Outra operação aplicada nas imagens deste trabalho não é propriamente derivada das operações mencionadas, mas é utilizada na etapa de pós-processamento já que elimina objetos por área. Conhecida como *analyze particles*, esta operação visa “limpar” a imagem, eliminando objetos que tenham área ou número de pixels dentro de uma faixa determinada [20, 28].

A Figura 4-18 mostra um exemplo de aplicação da operação *analyze particles* onde os objetos menores que 650 pixels foram eliminados da imagem segmentada. Este valor foi encontrado depois de realizar vários testes de tentativa e erro com diferentes valores.

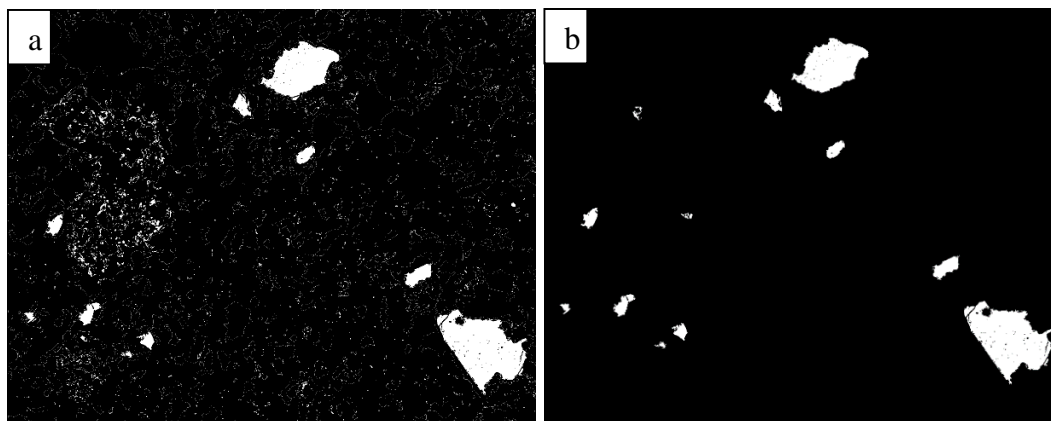


Figura 4-18 – Eliminação de objetos por área (*analyze particles*): a) Imagem com as partículas de quartzo segmentadas; b) Imagem sem objetos menores que 650 pixels.

4.2.4.4. Extração de Atributos

A extração de atributos é a etapa final na sequência do PADI, e é aqui onde se realiza a análise propriamente dita da imagem. O objetivo desta etapa é medir os objetos segmentados na imagem, e assim, gerar dados quantitativos que representam seus atributos característicos [7, 28, 29].

De modo geral, existem dois tipos de medidas: “medidas de Campo”, que são feitas na imagem como um todo e as “medidas de região”, as quais se referem aos objetos individualmente. São exemplos de medidas de campo o número de objetos, a área total dos objetos, e a fração de área, enquanto que as medidas de região podem ser o tamanho, a forma e a posição de cada objeto [7, 20, 28, 29].

Neste trabalho foram empregadas as medidas de campo para calcular as frações de área de cada fase presente no minério de ferro, obtidas a partir das imagens binárias de cada uma. Já que a fração de área está definida como a razão entre o número de pixels brancos e o número total de pixels dentro da pelota, a fração porcentual de área para cada fase foi calculada utilizando a equação:

$$\%f_A = \left(\frac{A_F}{A_T} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde: $\%f_A$ = Fração porcentual de área de fase

A_F = Área de cada fase

A_T = Área total das fases

A seguir são apresentados os fluxogramas com os procedimentos realizados com cada uma das técnicas MO (Figura 4-19), MEV (Figura 4-20), MO + MEV (Figura 4-21) e MicroCT (Figura 4-22).

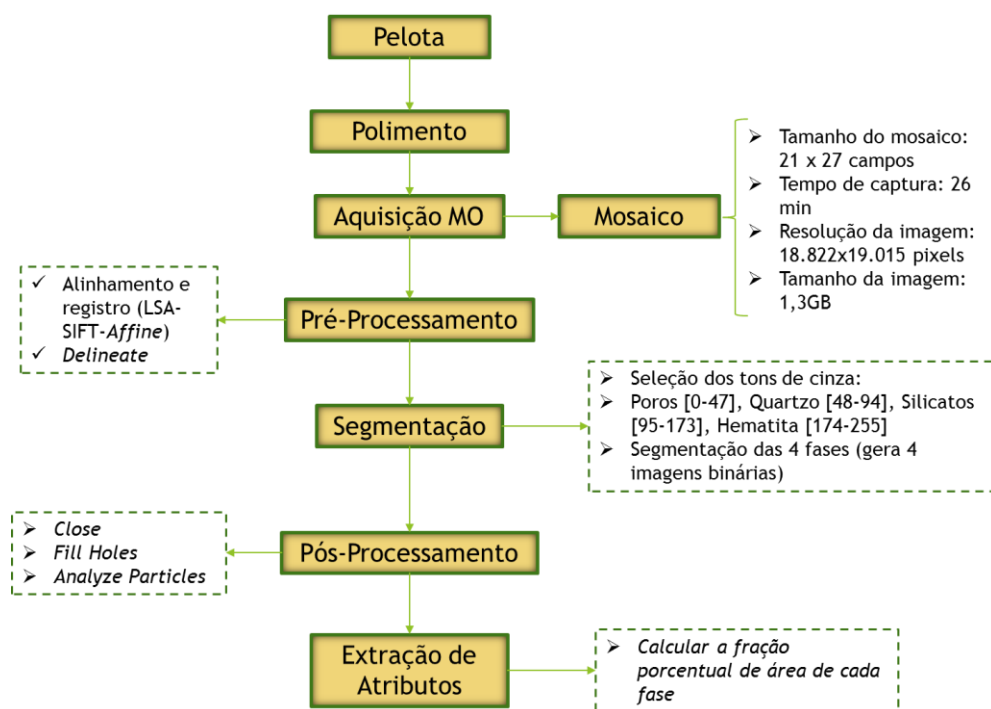


Figura 4-19 – Fluxograma da metodologia utilizada na quantificação das fases da pelota de minério de ferro empregando MO.

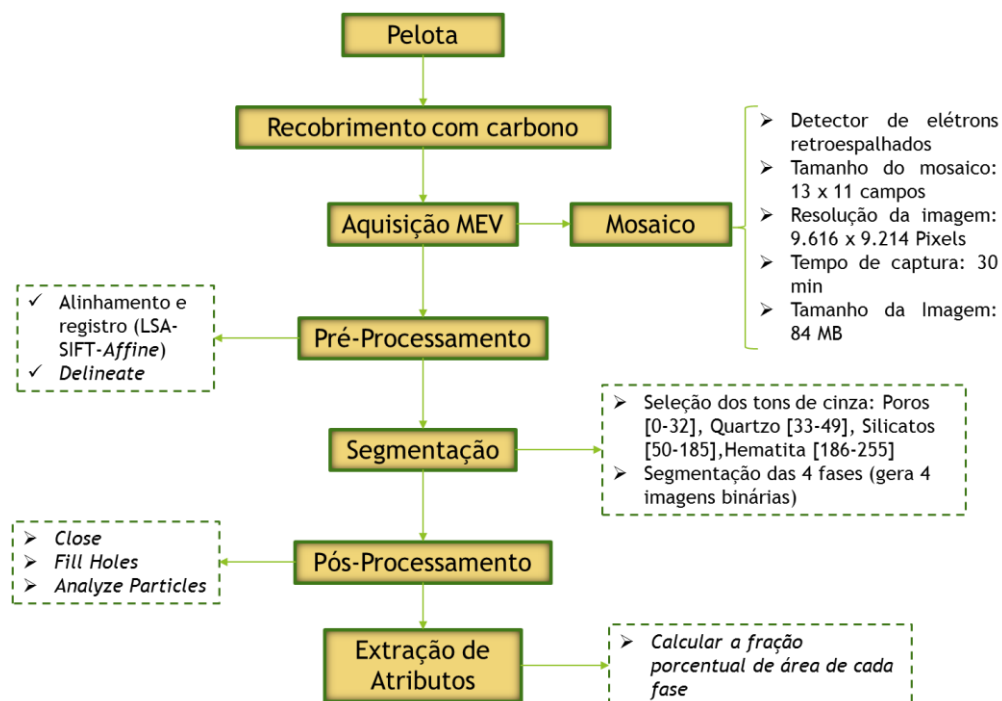


Figura 4-20 - Fluxograma da metodologia utilizada na quantificação das fases da pelota de minério de ferro empregando MEV.

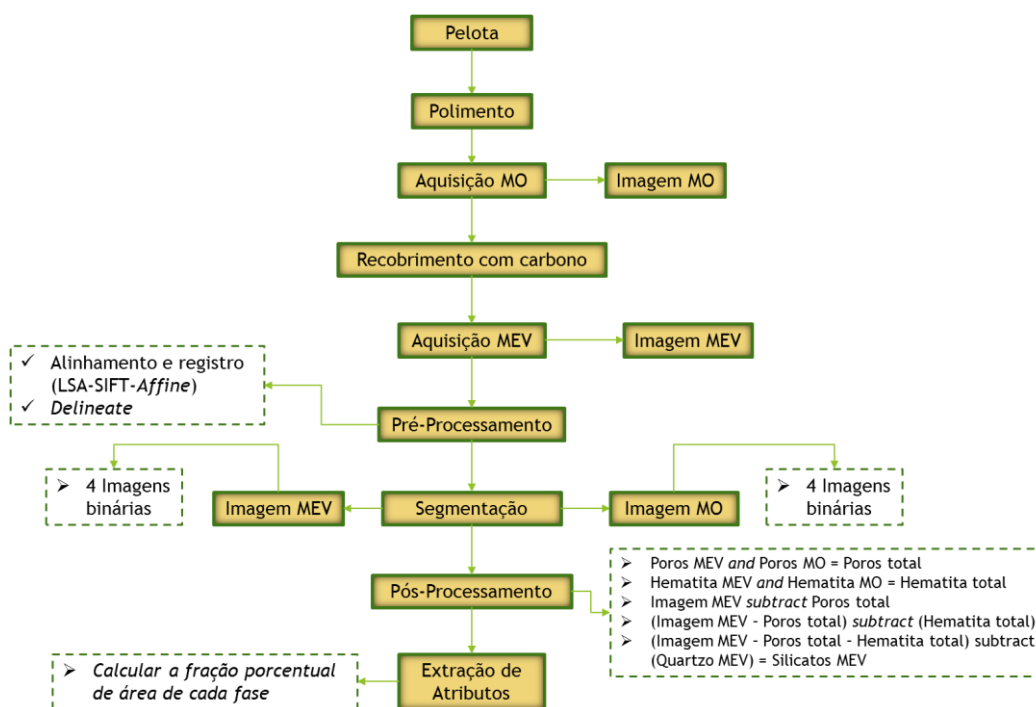


Figura 4-21 - Fluxograma da metodologia utilizada na quantificação das fases da pelota de minério de ferro empregando MO + MEV.

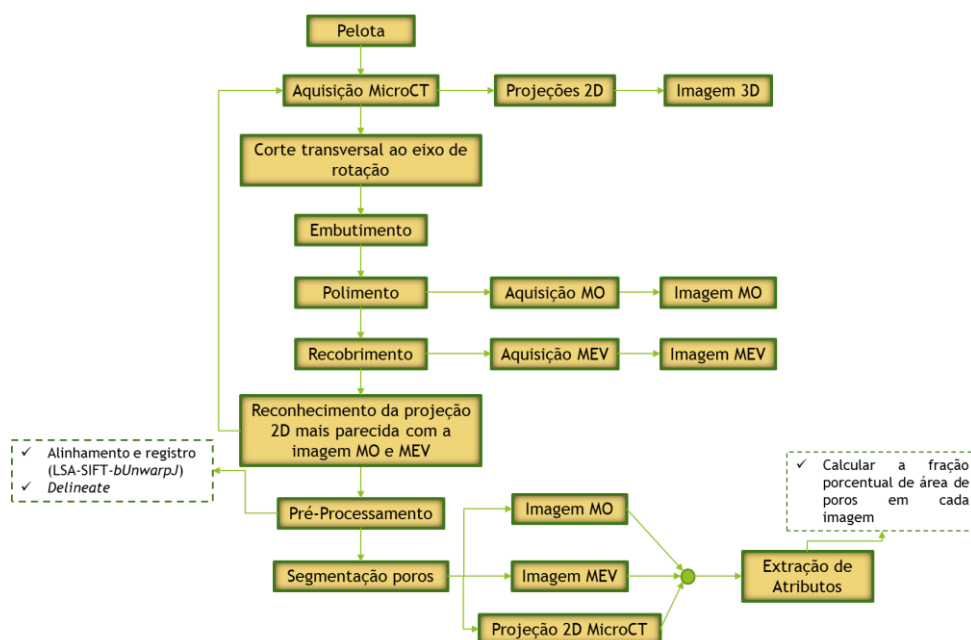


Figura 4-22- Fluxograma da metodologia utilizada na comparação da porosidade da pelota entre as técnicas MO, MEV e MicroCT.