

## 5 Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no presente trabalho assim como sua discussão. São apresentados os resultados do registro realizado nas imagens capturadas empregando duas técnicas diferentes (MO e MEV) assim como a segmentação e medição das fases presentes na pelota de minério de ferro e sua porosidade. Finalmente apresenta-se uma comparação das técnicas 2D versus 3D empregando a técnica de micro tomografia computadorizada para análise da porosidade nas pelotas e comparam-se os resultados obtidos.

### 5.1. Alinhamento e registro das imagens MO e MEV

Como explicado no capítulo 3, foi preciso realizar o registro das imagens obtidas no MEV e no MO (Figura 5-1), para poder realizar as medições das frações de área das imagens individuais e correlacionadas. Como as duas imagens originalmente tinham diferente orientação e número de pixels (Figura 5-1 – a, b), o primeiro passo foi aplicar uma cor característica em cada imagem a fim de permitir uma melhor visualização do tamanho das duas imagens sobrepostas, sendo vermelho para a imagem do MEV (Figura 5-1-a) e ciano para a imagem do MO (Figura 5-1-b). É possível observar na Figura 5-1-c como as imagens encontravam-se completamente desalinhadas e com tamanhos diferentes antes de fazer os ajustes necessários. Assim, girou-se a imagem do MEV mediante o comando “*flip*” para deixá-la em orientação similar à da imagem MO. Posteriormente igualou-se número de pixels nas duas imagens mediante o comando “*convert to largest scale*”. Mesmo depois de alinhadas, ainda as duas imagens não estão corretamente registradas, o que só é possível depois de aplicar a função de registro LSA-SIFT-Affine, que permite ter as duas imagens perfeitamente sobrepostas uma sobre a outra com um pequeno erro residual na periferia da imagem (Figura 5-1- d).

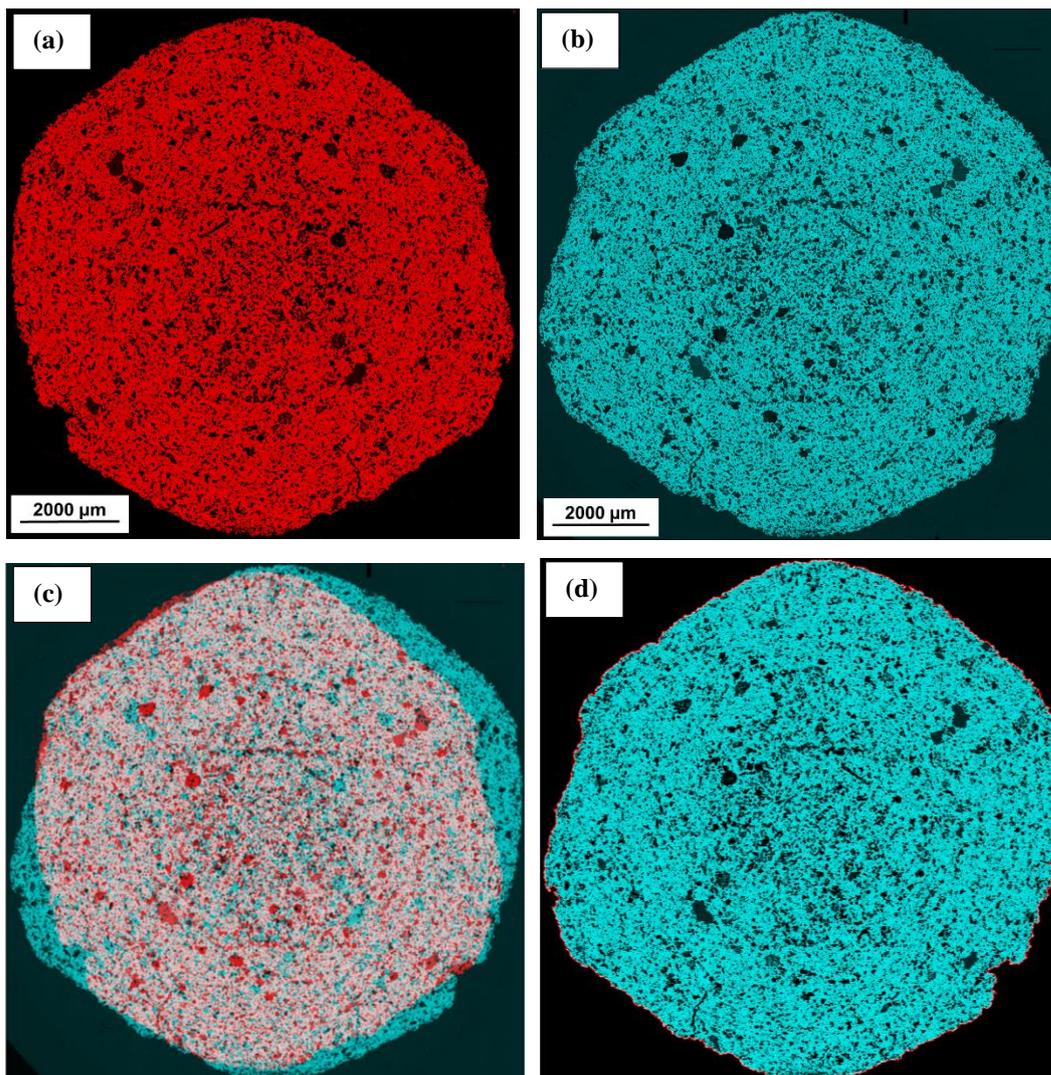


Figura 5-1- Registro das imagens obtidas: a) Imagem MEV original; b) Imagem MO original (ciano); c) Imagens desalinhadas antes da aplicação da função de registro; d) Imagens registradas após o uso da função LSA-SIFT.

## 5.2. Análise qualitativa da porosidade e as fases presentes na pelota

Uma vez registrados os mosaicos obtidos no MEV e no MO, pôde-se proceder à comparação qualitativa da porosidade, e das demais fases presentes na pelota de minério de ferro. Os resultados são apresentados a seguir.

### 5.2.1. Análise qualitativa usando MO

A Figura 5-2-a, apresenta a imagem da pelota de minério de ferro obtida mediante a técnica de MO. Esta técnica oferece um ótimo contraste para a identificação das diferentes fases presentes na pelota de minério de ferro a partir de suas refletâncias características. Na Figura 5-2-b, é possível observar a segmentação das diferentes fases da pelota depois de aplicar uma cor característica para cada uma das fases, sendo ciano os poros, verde o quartzo, azul os silicatos e vermelho a hematita. Depois de realizar um aumento em uma região da pelota (Figura 5-2-c) é possível observar melhor a distinção entre cada uma das fases presentes.

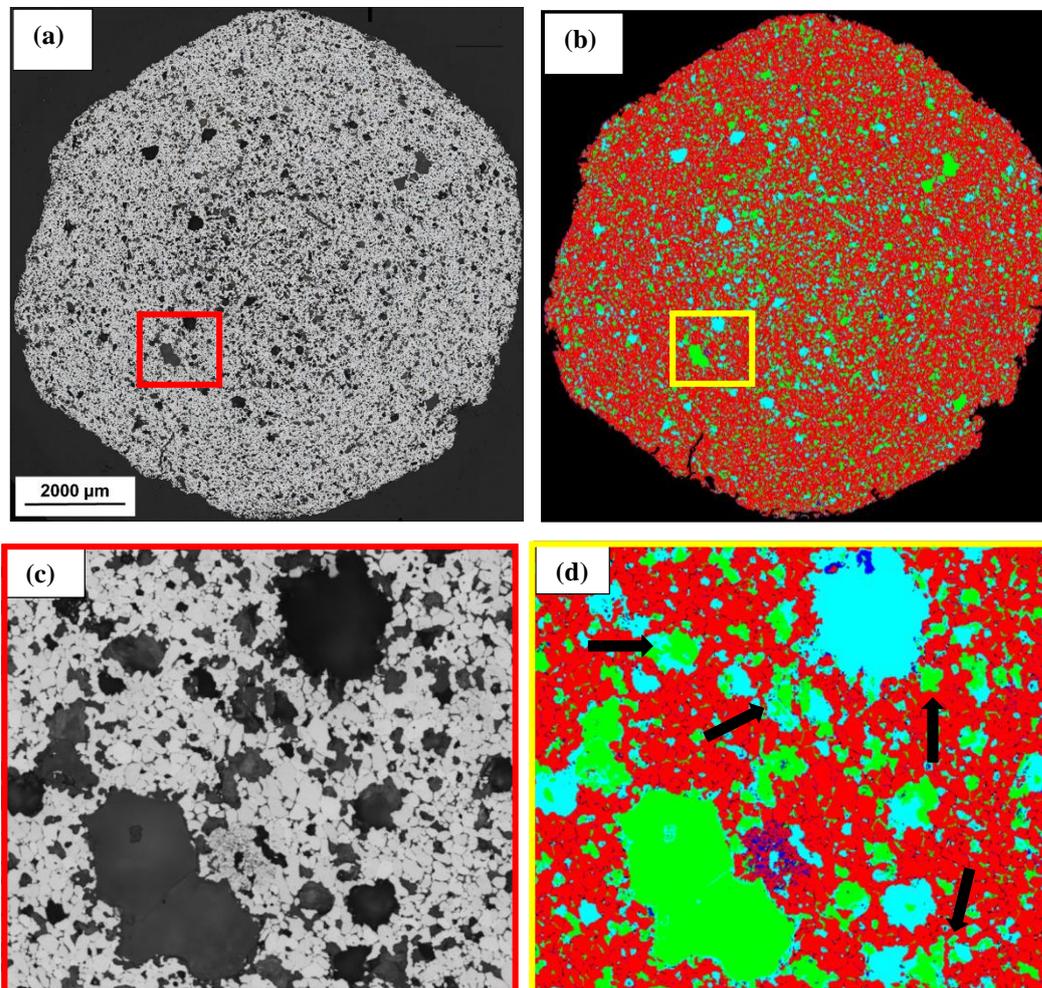


Figura 5-2 - Segmentação das fases presentes na pelota: a) Imagem da pelota obtida no MO; b) Segmentação das fases; c) Imagem ampliada de uma região da pelota; d) Imagem ampliada da região segmentada: ciano = poros, verde = quartzo, azul = silicatos e vermelho = hematita. As setas indicam a segmentação errada dos poros com resina confundidos com quartzo.

Contudo, a técnica de MO apresenta uma desvantagem: as partículas de quartzo se confundem com os poros que estão preenchidos com resina, dado que suas refletâncias são parecidas. Com isto, no momento de segmentar as fases, os poros preenchidos com resina são classificados como quartzo. Na Figura 5-2-d pode-se apreciar este problema, o qual gera como resultado uma subestimação na fração real dos poros e uma sobre estimacão na fração de quartzo. A vantagem da técnica é que permite diferenciar muito bem as partículas de silicatos dos poros, o qual é um problema comum empregando a técnica MEV.

Vale a pena salientar que mesmo não estando presente nas amostras das pelotas utilizadas nesse trabalho, existem amostras de pelotas de minério de ferro que contêm magnetita junto com as demais fases apresentadas aqui. No caso de amostras com magnetita, a técnica de MO é eficiente para diferenciar magnetita de hematita, o que é bastante difícil no MEV.

### **5.2.2. Análise qualitativa usando MEV**

A imagem da pelota de minério de ferro obtida mediante a técnica MEV é apresentada na Figura 5-3-a. Depois de realizar a segmentação das fases presentes e aplicar a mesma tabela de cores usada na subseção anterior, pode-se observar o resultado da segmentação na Figura 5-3-b. Ao fazer um aumento da mesma região escolhida na análise empregando MO (Figura 5-3-c), é possível observar melhor os detalhes característicos de cada fase e assim identificá-las pelas suas tonalidades.

Analisando a região segmentada e ampliada da pelota (Figura 5-3-d) é possível observar como o método de segmentação empregado na imagem MEV da pelota separa muito bem o quartzo dos poros preenchidos com resina, que como foi mencionado na seção anterior, geralmente se confundem empregando a técnica de MO.

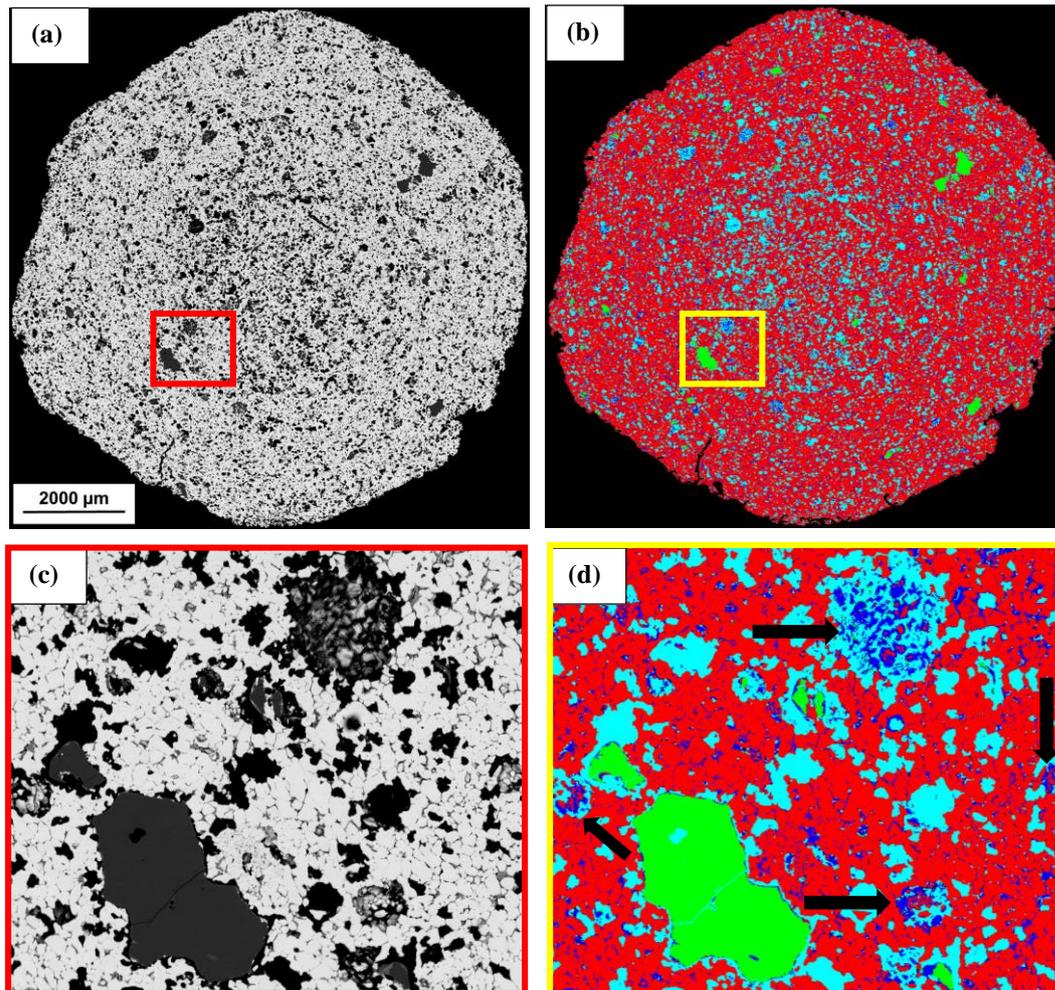


Figura 5-3- Segmentação das fases presentes na pelota: a) Imagem da pelota obtida no MEV; b) Segmentação das fases; c) Imagem ampliada de uma região da pelota; d) Imagem ampliada da região segmentada: ciano = poros, verde = quartzo, azul = silicatos e vermelho = hematita. As setas indicam os poros que são segmentados como silicatos.

A desvantagem desta técnica é que algumas partículas de silicatos se confundem com poros não preenchidos. Isto pode gerar um problema ao quantificar as fases já que iria subestimar a quantidade de poros e sobre estimar a fração de silicatos.

Comparando a Figura 5-3-d e a Figura 5-2-d é possível ver como em ambos os casos a fração de poros vê-se subestimada devido à identificação errada com outra fase (poros preenchidos como quartzo no MO e poros não preenchidos como silicatos no MEV). Em ambos os casos a hematita é segmentada corretamente e não apresenta problemas já que apresenta um pico mais claro e definido do que as demais fases. Contudo, é bom salientar que a segmentação da hematita na imagem

MEV não apresenta problema porque as amostras estudadas neste trabalho não contêm magnetita.

### 5.2.3. Análise qualitativa usando MO e MEV correlacionadas

Depois de realizar a segmentação das fases empregando as técnicas de MO e MEV por separado e observar as vantagens e desvantagens que cada uma das técnicas oferece, decidiu-se correlacionar as duas técnicas empregando processamento digital de imagens como explicado na seção 4.2.

Para realizar o processo de correlação foram empregadas as mesmas imagens mostradas nas subseções anteriores, obtidas no MEV (Figura 5-5 Regiões da figura anterior ampliadas: -a) e no MO (Figura 5-5 Regiões da figura anterior ampliadas: -b). Depois de realizar a segmentação das fases em cada uma das imagens como já foi explicado, obtiveram-se as imagens binárias de cada uma, sendo:  $P_{MO}$  a imagem dos poros segmentados no MO e  $P_{MEV}$  a imagem dos poros segmentados no MEV. Assim,  $(P_{MO}) OR (P_{MEV}) = P_V$  onde  $P_V$  corresponde aos poros “verdadeiros” obtidos como resultados da junção das duas segmentações.

Procedeu-se então a subtrair a imagem  $P_V$  da imagem MEV original ( $I_{MEV}$ ) ficando como resultado as fases restantes:  $I_{MEV} - P_V = Q + S + H$ .

Sabendo que a segmentação realizada empregando a imagem MEV realiza uma correta identificação das partículas de quartzo, foi subtraída também esta imagem binária:  $I_{MEV} - Q_{MEV} = S + H$ .

Realizou-se com as partículas de hematita o mesmo procedimento feito com os poros:  $(H_{MO}) OR (H_{MEV}) = H_V$  e finalmente:  $I_{MEV} - H_V = S$ .

O resultado é uma imagem MEV contendo somente as partículas de silicatos, que como já foi visto eram as partículas mais difíceis de segmentar na imagem do MEV já que eram confundidas com os poros não preenchidos.

Finalmente tendo todas as imagens binárias segmentadas de cada uma das fases, realizou-se a combinação de todas mediante a opção “merge channels”. As mesmas cores aplicadas às fases nas subseções anteriores foram atribuídas, obtendo como resultado uma imagem colorida formada por todas as fases segmentadas corretamente (Figura 5-5 Regiões da figura anterior ampliadas: -c).

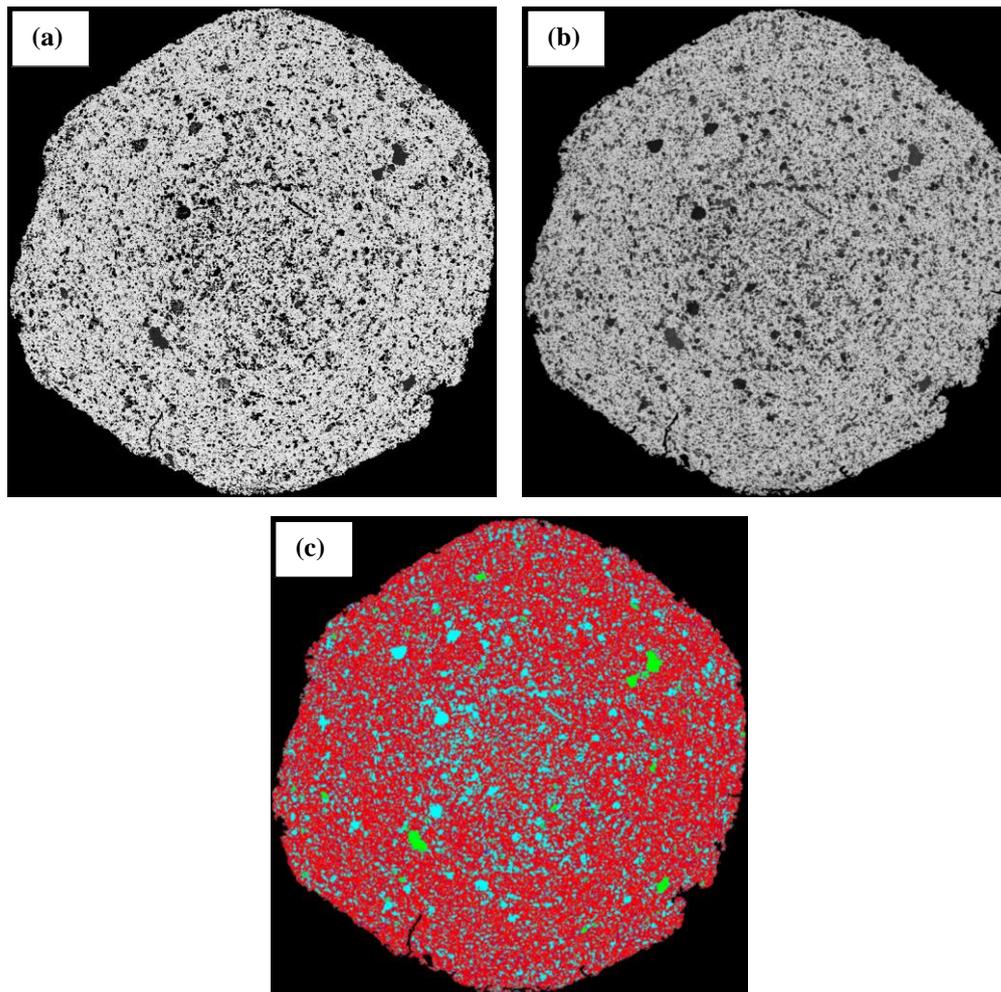


Figura 5-4 – Correlação MEV+MO: a) Imagem MEV; b) Imagem MO; c) Correlação das fases segmentadas: ciano = poros, verde = quartzo, azul = silicatos e vermelho = hematita.

A Figura 5-5 Regiões da figura anterior ampliadas: apresenta uma região ampliada da pelota mostrada na figura anterior, onde: a) imagem de MO, b) imagem MEV, c) resultado da segmentação das fases na imagem de MO, d) resultado da segmentação das fases na imagem de MEV, e) resultado da segmentação das fases utilizando a correlação anteriormente descrita.

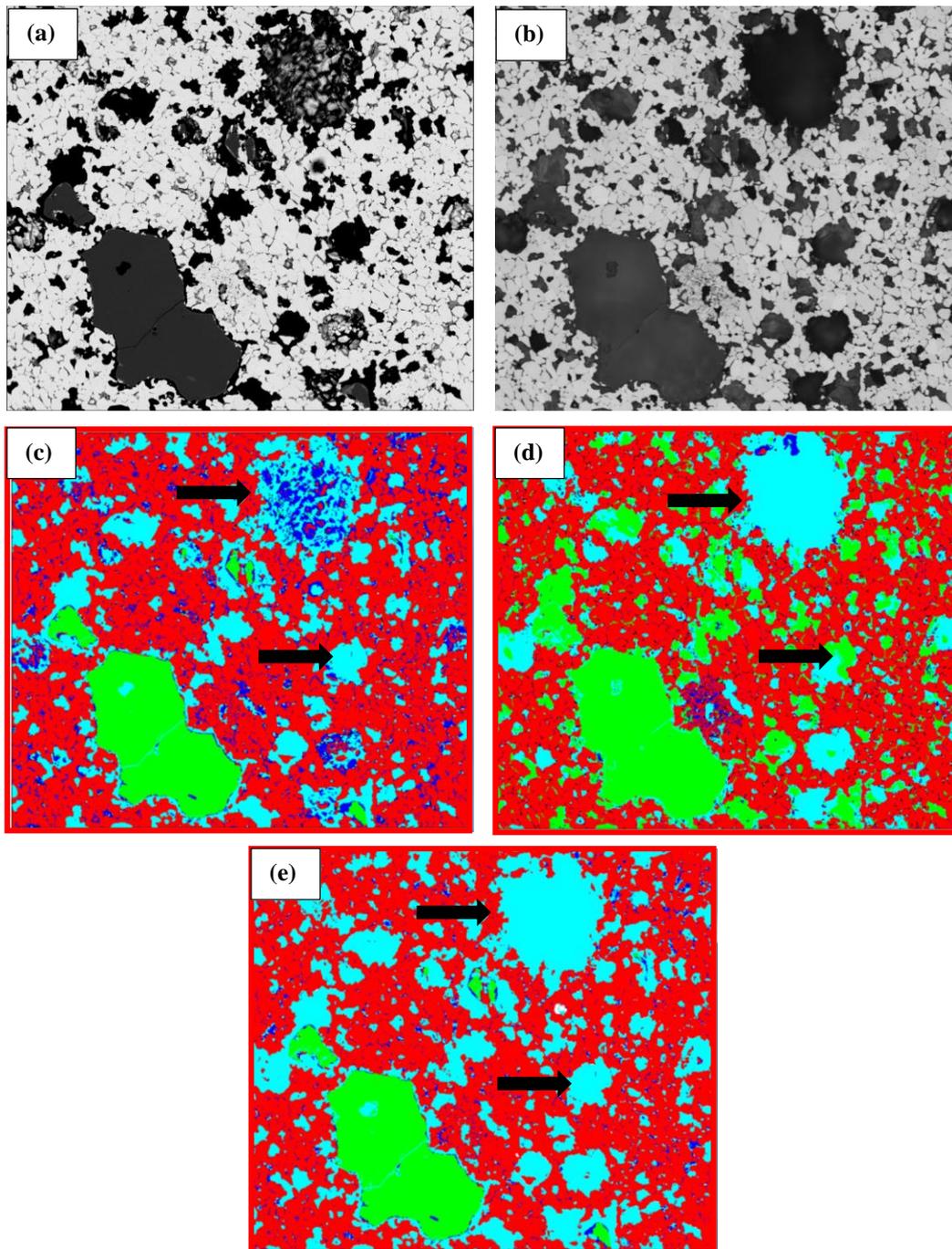


Figura 5-5 Regiões da figura anterior ampliadas: a) Região ampliada de MEV; b) Região da pelota no MO; c) Região ampliada e segmentada MEV; d) Região ampliada e segmentada MO; e) Região ampliada, correlacionada e segmentada.

Sendo assim, é possível observar como a correlação das imagens obtidas por MEV e MO, oferece melhores resultados na segmentação das fases. Isto é possível uma vez que este método combina as vantagens das duas técnicas de microscopia e permite diferenciar melhor as fases que se confundiam com outras usando as duas

técnicas em separado. Pode se observar claramente como os quartzos e os silicatos são corretamente separados dos poros.

A porosidade vê-se diretamente afetada neste resultado, já que, segmentando as imagens em separado (tanto no MEV quanto no MO) apresentam-se erros na hora de escolher o limiar adequado para segmentar as fases. Isto pode levar a confundir os poros com outras fases e assim gerar resultados errados, que irão apresentar conclusões enganosas com respeito das propriedades mecânicas da pelota. Usando a correlação das duas técnicas obtêm-se melhores resultados na segmentação, que permitem quantificar melhor as diferentes fases.

### 5.3. Análise quantitativa dos resultados

Fazendo uso das técnicas de análise digital de imagens, quantificaram-se as diferentes frações de área de cada uma das fases presentes nas 3 pelotas analisadas (P1, P2, P3). São estas imagens a obtida por MO, MEV e finalmente a imagem resultante da correlação MO+MEV. Os resultados são apresentados na Figura 5-6.

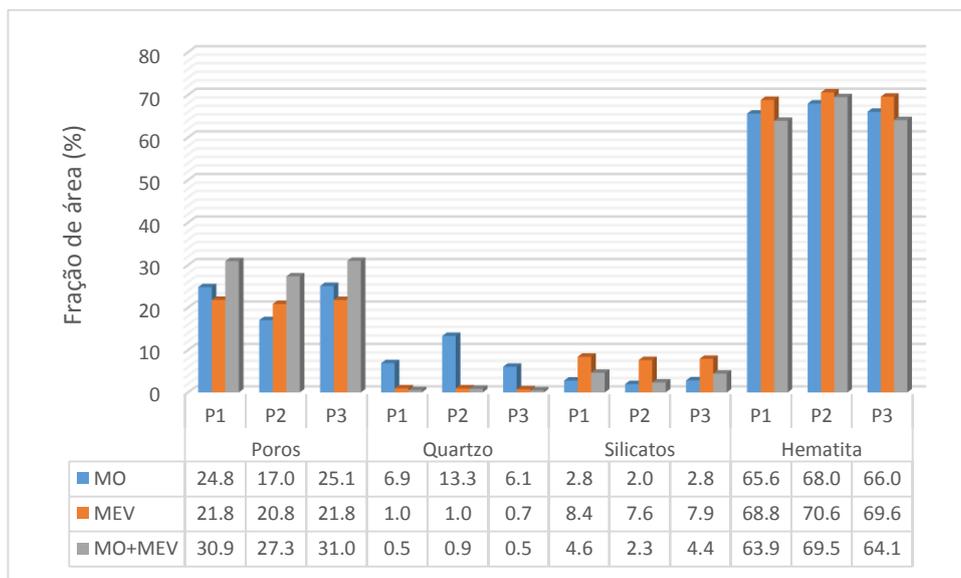


Figura 5-6 - Frações de fase (%) nas 3 pelotas de minério de ferro analisadas a partir das diferentes técnicas (MO e MEV) e sua correlação (MO+MEV).

Estes resultados quantitativos corroboram os resultados qualitativos analisados na seção 4.2. Como pode-se observar, empregando a técnica de MO a quantificação das partículas de quartzo é muito elevada nas 3 pelotas, isto devido ao fato já explicado que os poros preenchidos com resina se confundem com as

partículas de quartzo gerando assim uma subestimação do valor dos poros e uma sobre estimacão da fracão de área dos quartzos.

Analisando a técnica MEV pode-se observar que para as três pelotas, os valores das fracões de área dos silicatos são maiores que as obtidas para esta mesma fase empregando MO. Isto se deve à sobre estimacão das partículas de silicatos que não são corretamente segmentadas apresentando confusão com os poros não preenchidos e, portanto, nesta técnica o valor dos poros também é subestimado.

Finalmente, observando os valores obtidos para a correlacão das duas técnicas é possível ver como o valor da porosidade aumenta nas três pelotas, pois é o resultado da combinacão das segmentaçoes de cada técnica onde os poros se encontravam subestimados.

Os valores medidos das fracões de área das partículas de quartzo são similares aos obtidos nas segmentaçoes feitas no MEV nos três casos, já que esta técnica oferece uma melhor identificacão dessa fase. Enquanto o valor da fracão de área das partículas de silicatos é próximo com o obtido na segmentacão feita com o MO, pois como era de se esperar, esta técnica oferece uma melhor identificacão desta fase nas 3 pelotas.

Já os valores encontrados das fracões de área da hematita são similares tanto nas duas técnicas por separado quanto na correlacão de ambas (para as 3 pelotas), pois, como já foi dito, esta fase não apresenta problemas de identificacão em nenhuma das duas técnicas (no caso MEV, por conta da ausênciade magnetita) apresentando um pico bem definido no histograma e facilitando sua segmentacão.

#### **5.4. Análise comparativa da porosidade 2D Vs. 3D**

A comparacão entre imagens MO, MEV e MicroCT seguiu a metodologia explicada na seçao 4.2.3. Os resultados são apresentados a seguir.

As Figuras 5.7-a e b mostram, respectivamente, as imagens MEV, MO. A Figura 5.7-c mostra a imagem de MicroCT identificada por correlacão. Nota-se a semelhança entre estas 3 imagens, mas a imagem de MicroCT ainda não está perfeitamente alinhada com as outras duas. A Figura 5.7-d mostra a imagem de MicroCT após o registro com a imagem de MEV. À primeira vista o registro parece ter pouco efeito, mas seu impacto pode ser avaliado observando a figura 5.7-e. Nesta figura a linha verde corresponde à borda da imagem registrada, sobreposta à

imagem original de microCT, em vermelho. Este resultado indica que os planos de observação estão levemente desalinhados, provavelmente porque o plano de corte da pelota não ser exatamente ortogonal ao eixo z da tomografia.

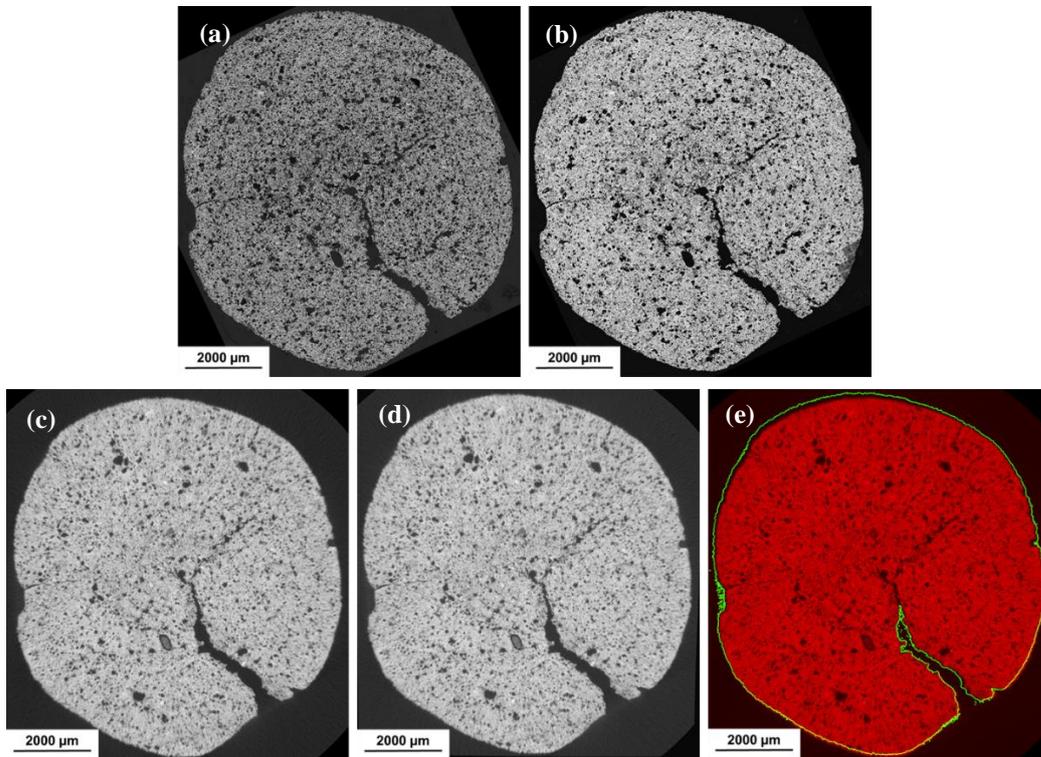


Figura 5-7 – Comparação das técnicas diferentes: a) Imagem MEV; b) Imagem MO; c) Imagem MicroCT identificada pela correlação; d) Imagem MicroCT após registrada; e) Efeito do registro na imagem MicroCT.

Na Figura 5 8-a observa-se a imagem binária resultante da segmentação dos poros na imagem MEV e na Figura 5 8-b apresenta-se o mesmo resultado para a imagem de MO. Observa-se que existe uma elevada densidade de poros nas duas imagens.

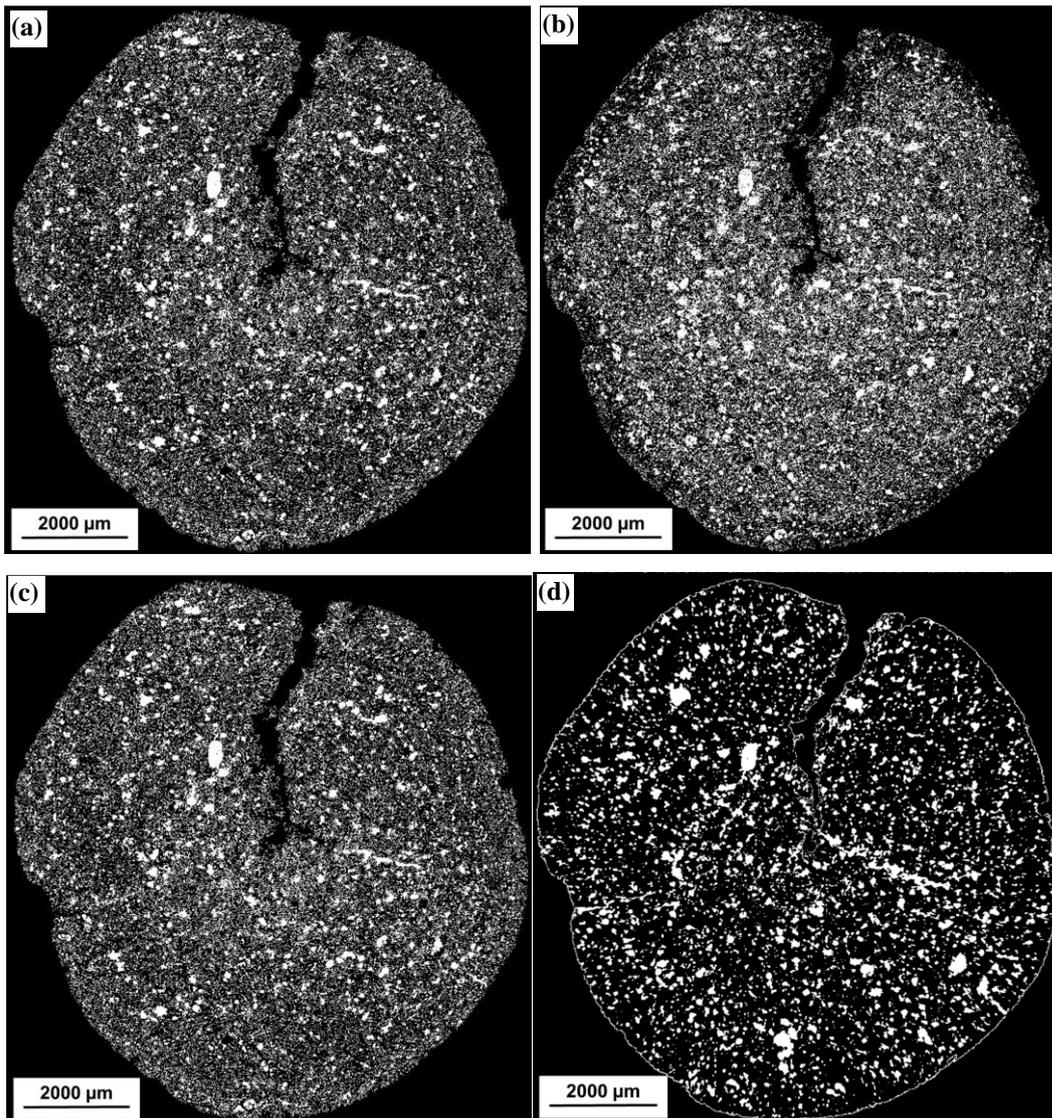


Figura 5-8 – Análise qualitativa da porosidade: a) Poros MEV segmentados; b) Poros MO segmentados; c) Poros MO + MEV segmentados; d) Poros segmentados em uma das projeções microCT.

Correlacionando as duas técnicas 2D (Figura 5 8-c), encontrou-se que a densidade de poros segmentados foi maior juntando as duas técnicas, como já foi explicado nas seções.

Analisando a imagem dos poros obtida por microtomografia (Figura 5 8-d) é possível observar que a densidade de poros é menor que nas outras duas imagens. Isto pode ter sido ocasionado pela baixa resolução desta técnica se comparada com as técnicas 2D. No caso da microCT, a lente usada de 0,4X levou a um tamanho de pixel de aproximadamente 8µm enquanto as técnicas MO e MEV, usando uma lente

de 20X levaram um tamanho de pixel de  $0,53\mu\text{m}$ . Assim, os poros pequenos visíveis por MO e MEV, não são resolvidos em microCT.

Na Tabela 5-1 são apresentadas as frações de área percentual dos poros para cada uma das imagens obtidas. Os resultados confirmam a análise qualitativa feita anteriormente. A fração de poros medida por microCT foi muito menor enquanto a fração de área dos poros segmentados correlacionando as duas técnicas é maior do que usando cada técnica separadamente.

Tabela 5-1 - Frações de área dos poros para cada uma das técnicas empregadas (MEV, MO, MO+MEV e microCT).

| <b>Técnica</b>  | <b>Frações de área de poros (%)</b> |
|-----------------|-------------------------------------|
| <b>MO</b>       | 35,4                                |
| <b>MEV</b>      | 31,2                                |
| <b>MO + MEV</b> | 38,1                                |
| <b>MicroCT</b>  | 18,7                                |

É importante realçar que as 3 técnicas empregam a interação de radiações distintas com a amostra. Além disso, no caso de microCT a imagem é reconstruída a partir de inúmeras imagens de raios-X transmitidos através da amostra. Assim, a comparação direta entre as técnicas é difícil.

Todos os fatores anteriores afetam a qualidade final da imagem formada e, portanto, as medições realizadas. Vale a pena mencionar que a técnica de microCT foi utilizada como uma técnica complementar nesse trabalho que visa comparar os dados obtidos empregando as técnicas 2D. Os resultados obtidos não indicam que a técnica seja melhor ou pior que as outras duas, mas permite observar que nessas condições e com a lente empregada não é possível obter medições tão precisas quanto as obtidas mediante as técnicas de microscopia 2D.

Uma alternativa possível para melhorar as medições obtidas por microCT seria trabalhar com uma lente de maior aumento. Desse modo, a resolução da imagem iria melhorar permitindo ter uma melhor identificação dos poros presentes e, provavelmente, mais semelhante à obtida pelas técnicas 2D.

Contudo, o problema é que o uso de uma lente de maior aumento impossibilita observar a pelota como um todo, mas apenas um sub volume. Uma possível

alternativa seria observar apenas uma seção 2D deste sub volume e comparar com imagens 2D correspondentes obtidas por MO e MEV.