

## 5 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão expostos e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho. Estes resultados mostram a importância das diferentes técnicas de aquisição, com captura em mosaico e uso da polarização circular, bem como da filtragem de ruído e ajustes dos métodos de classificação, nos resultados de classificação final.

### 5.1. Otimização do *Frame* da Câmera

Após alguns testes, observou-se que o contraste entre os cristais de hematita varia segundo o *frame* da câmera empregado e sua posição na captura da imagem. Como o centro do *frame* da câmera é a região mais homogênea, então quanto menor e mais centrado for o *subframe*, maior é o contraste entre cristais com o menor gradiente de iluminação devido ao fundo.

Por outro lado, se considerou cobrir uma grande região da amostra com o objetivo de poder analisar, numa mesma imagem, vários tipos de hematita. Para isso, foi empregada a técnica de captura em mosaico utilizando campos *full frame* de 2584x1936 e campos *subframe* de 200x200 como apresentado na Figura 5-1.

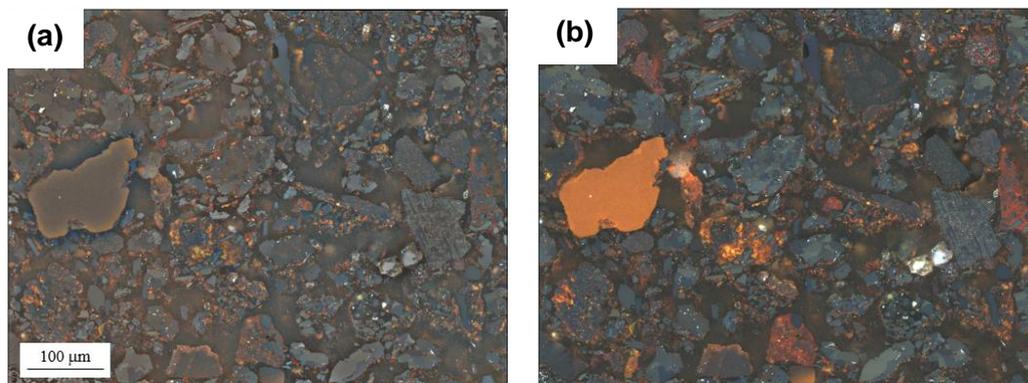


Figura 5-1: Tipos de aquisição de imagens CPOL: (a) Mosaico 2x2 com *full frame*; (b) Mosaico 28x21 *subframe* de 200x200.

## 5.2. Análise Qualitativa das Diferentes Técnicas de Captura

Como já foi explicado na seção 4.2, este trabalho pretende analisar 4 técnicas de aquisição em imagens CPOL (*full frame*, *subframe*, *subframe saturada*, *subframe saturada NLM*). O objetivo desta seção é precisamente analisar, do ponto de vista qualitativo, estas 4 técnicas.

### 5.2.1. Comparação de imagens *Full Frame* com *Subframe*

Com o uso do *full frame* é necessária uma correção de fundo devido a que a imagem capturada mostrou um gradiente de iluminação (Figura 5-2a). A imagem que é apresentada na Figura 5-2b é o resultado da correção deste fundo. Esta imagem, embora não mostre mais o gradiente de iluminação, sofreu perda de informação devido à correção de fundo. Como pode ser observado na região ampliada da Figura 5-2b, as bordas dos cristais estão pouco nítidas.

Já com o uso do *subframe* o problema de iluminação foi corrigido (Figura 5-2c) sem empregar correção de fundo. Com esta técnica se evita a perda de qualidade da imagem citada acima. Observando a mesma região ampliada, desta vez é possível diferenciar muito melhor as bordas dos cristais de hematita.

Contudo, o uso do *subframe* também tem desvantagens. O uso desta técnica tem o inconveniente de ter que capturar muito mais campos para cobrir a mesma área do *full frame*. Por exemplo, supondo que se queira cobrir uma área equivalente a 2x2 campos em *full frame* de 2584x1936 pixels por campo, então será necessário capturar um mosaico 28x21 campos em *subframe* de 200x200 pixels por campo. Isto faz com que o tempo empregado na captura do mosaico utilizando *subframe* seja de 11min, em quanto o tempo empregado na captura do mosaico utilizando *full frame* seja de apenas 10 s.

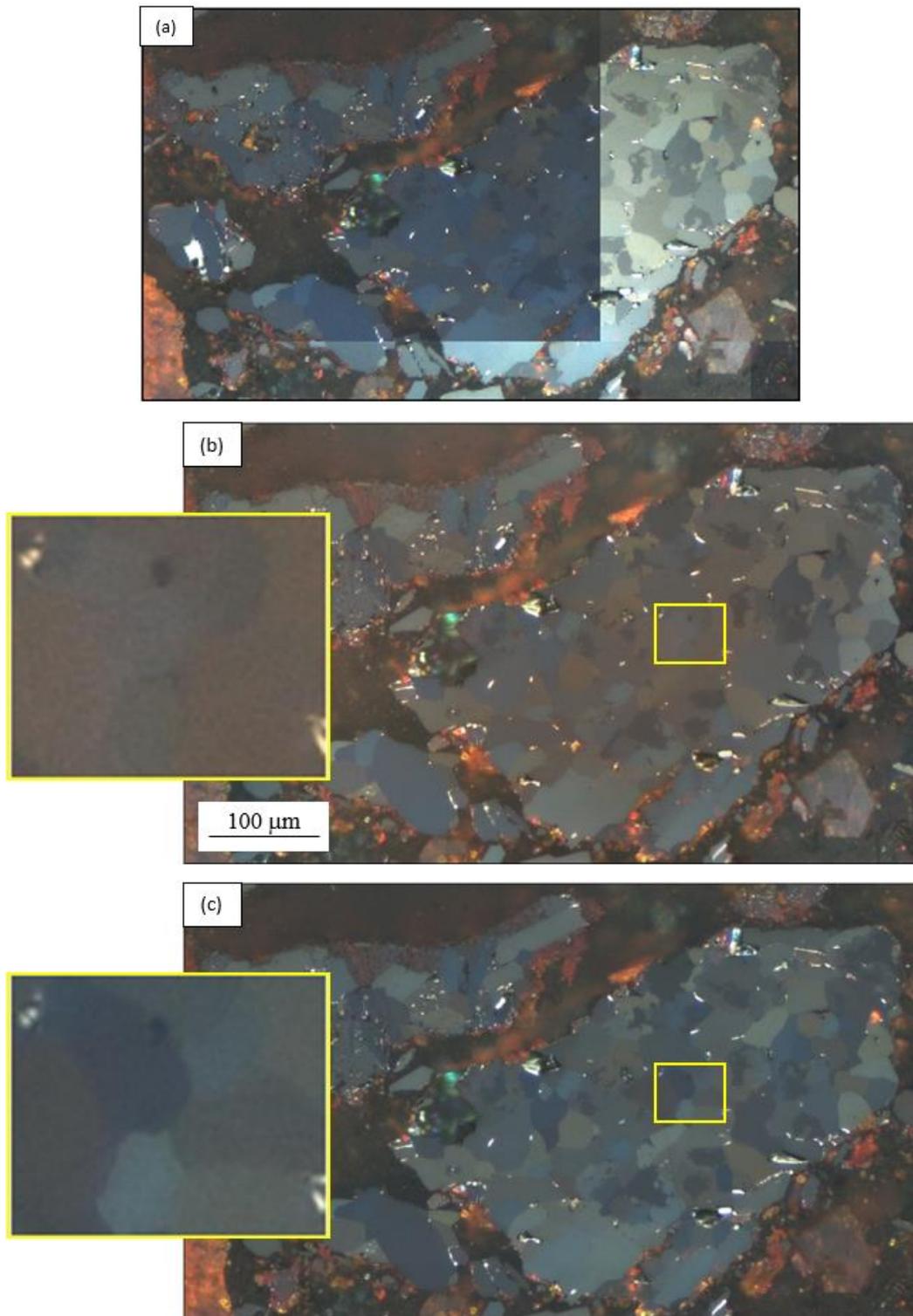


Figura 5-2: Fração dos mosaicos originais da Figura 5-1 que mostram a comparação entre as imagens: (a) CPOL *full frame* 2x2 com gradiente de iluminação (b) CPOL *full frame* com gradiente de iluminação corrigido; (c) CPOL *subframe*.

### 5.2.2. Comparação de Imagens *Subframe* com *Subframe Saturadas*

Considerando que é obtido um melhor resultado empregando a técnica mosaico com *subframe*, então será adicionado a este resultado o recurso de saturação da câmera.

Aparentemente, com o uso do recurso de saturação da câmera, o contraste entre os cristais de hematita melhorou ainda mais. Isto pode ser observado na Figura 5-3b. Por outro lado, o ruído presente na imagem também se torna mais nítido, o que terá consequências importantes, como descrito mais abaixo.

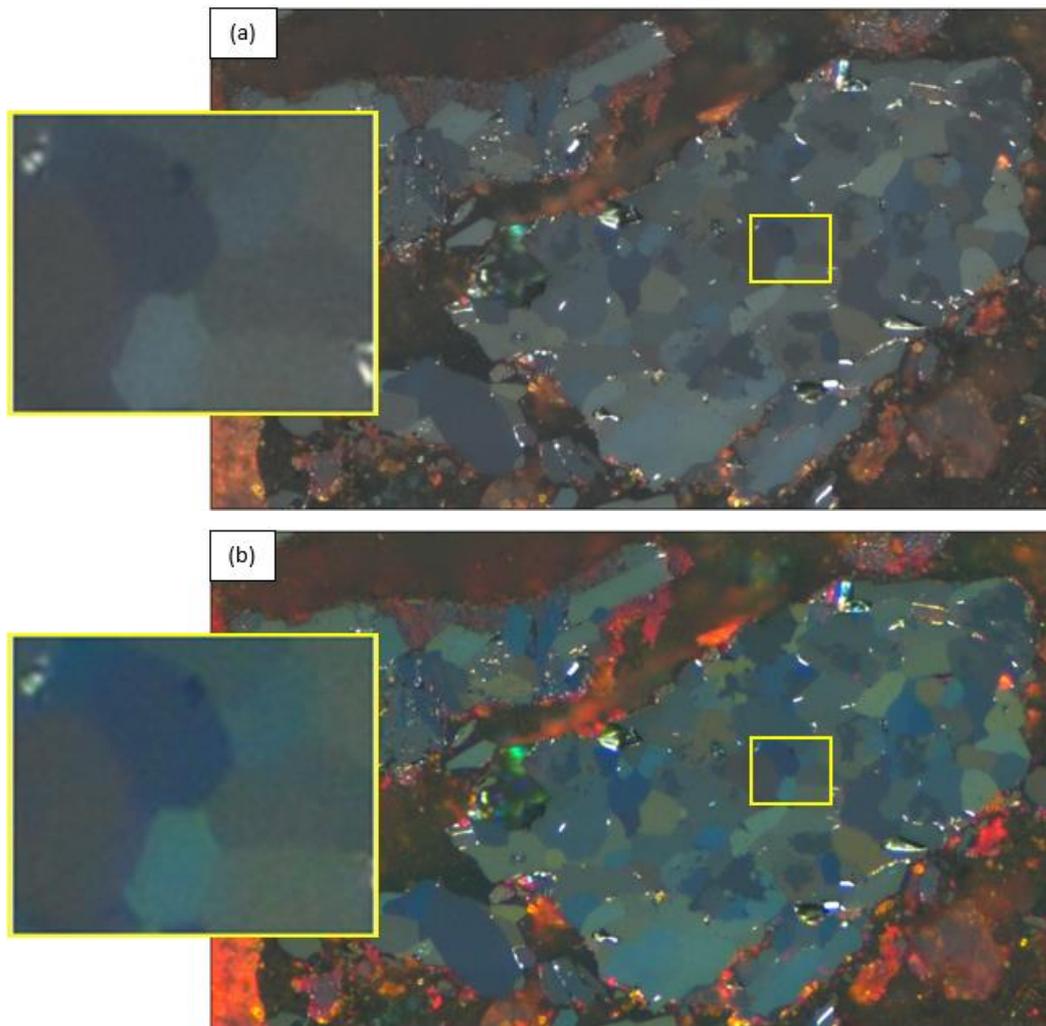


Figura 5-3: Comparação entre as imagens: (a) CPOL *subframe e*; (b) CPOL *subframe saturada*.

### 5.2.3. Comparação de Imagens *Subframe* saturadas com *Subframe* saturadas NLM

Ao empregar o filtro NLM na imagem *subframe* saturada, pode-se observar que o contraste aumentou significativamente devido à forte redução do ruído. Isto pode ser observado na Figura 5-4b.

Para uma melhor visualização, foi ampliada uma região da Figura 5-4a onde observa-se que a imagem apresenta ruído e arranhões. Estes defeitos foram eliminados ao aplicar o filtro NLM como pode ser observado na região ampliada da Figura 5-4b.

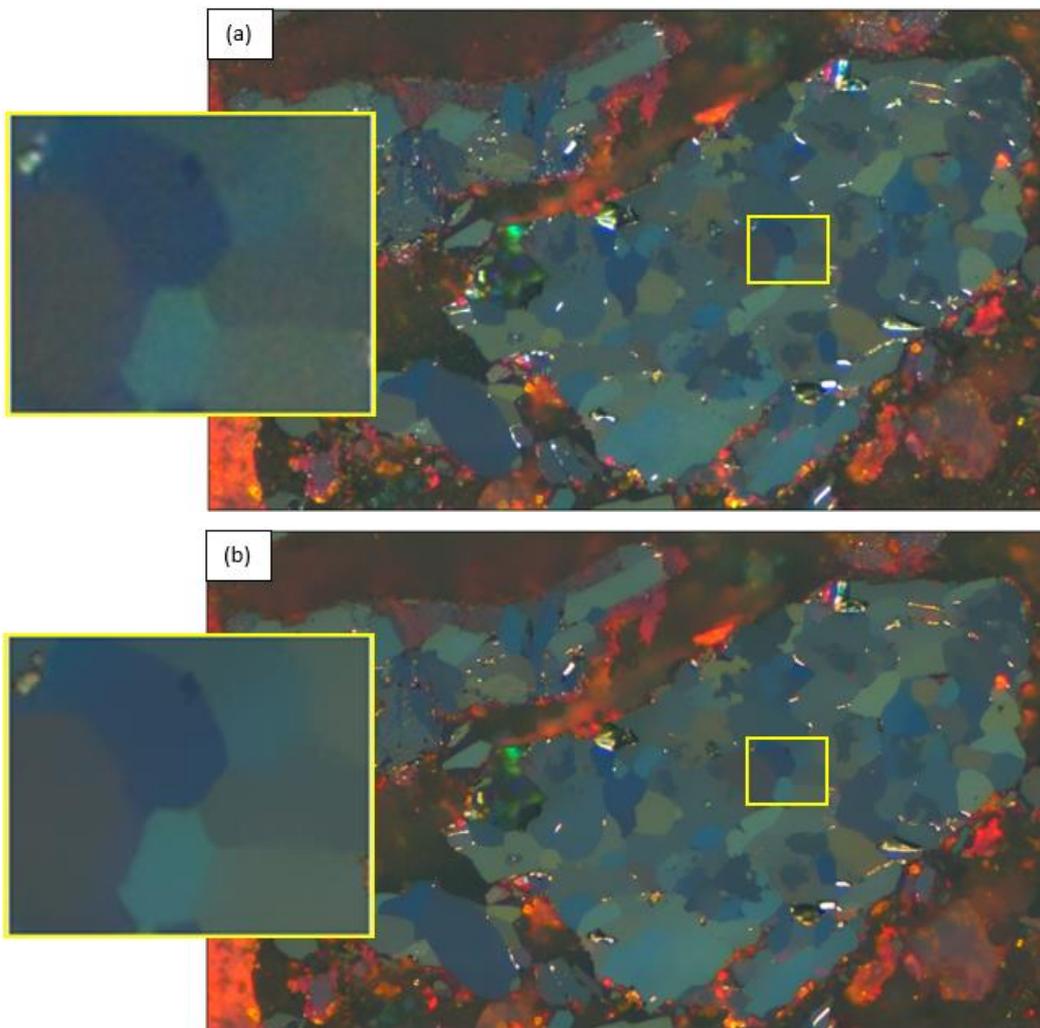


Figura 5-4: Comparação entre as imagens: (c) CPOL *subframe* saturada e;  
(d) CPOL *subframe* saturadas NLM.

### 5.3. Análise Estatística do Método Sintético

Fazendo uso dos parâmetros de Haralick, classificou-se os três tipos de hematita (Compacta, Martita e Microcristalina) empregando o classificador quadrático. Esta classificação foi aplicada em cada um dos 4 métodos de captura (*full frame*, *subframe*, *subframe saturada* e *subframe saturada NLM*). Para isto, um classificador foi previamente treinado para cada método de captura. A qualidade do classificador foi avaliada por validação cruzada e os resultados podem ser observados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Taxa de acerto da classificação nas imagens CPOL.

| Técnica de Validação | Classes         | Quadrático TA (%) |                 |                           |                               |
|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
|                      |                 | <i>Full frame</i> | <i>Subframe</i> | <i>Subframe saturadas</i> | <i>Subframe saturadas NLM</i> |
| Validação cruzada    | Compacta        | 89,3              | 88,6            | 89,1                      | 91,8                          |
|                      | Martita         | 80,4              | 82,7            | 85,4                      | 70,6                          |
|                      | Microcristalina | 83,5              | 82,8            | 83,5                      | 82,8                          |
|                      | Global          | 85,63             | 85,78           | 86,91                     | 84,11                         |

TA (%): Taxa de acerto em %.

Esta validação cruzada foi realizada no software livre Weka (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*). O Weka faz a validação cruzada treinando o classificador com nove décimos da base de dados e uma vez treinado, aplica ao décimo restante. Este processo é repetido dez vezes em cada uma das condições de aquisição empregando-se uma diferente partição. Desta forma, são realizadas dez classificações com conjuntos de treinamento e validação diferentes, e o resultado final corresponde à média das taxas de acerto para cada combinação.

Desta forma, ao analisar a Tabela 5-1 pode-se dizer que o método de captura de imagens com *subframe*, saturadas NLM, apresentou a melhor taxa de acerto para a hematita compacta. Em contrapartida, este mesmo método de captura apresentou a taxa de acerto mais baixa para o caso da martita e um dos mais baixos para a microcristalina. De forma geral, a melhor taxa de acerto global, para as 4 condições de aquisição, foi para as imagens obtidas com *subframe* saturadas. Contudo, as taxas globais ficaram muito próximas, não sendo conclusivo qual método de captura poderia ser o mais indicado para ser usado no método sintético.

A Tabela 5-2, Tabela 5-3, Tabela 5-4 e Tabela 5-5 mostram as matrizes de confusão para as 4 condições de aquisição/filtragem, obtidas a partir da taxa global de acerto correspondente à validação cruzada do classificador quadrático. O objetivo de criar uma matriz de confusão é identificar de maneira simples as classes em que o classificador errou. Ao mesmo tempo, aponta quantos objetos de uma classe foram classificados erradamente, assim como, com quais classes estes foram confundidos.

Para imagens *full frame* (Tabela 5-2) a matriz de confusão mostrou que no caso da hematita compacta, de um total de 51595 regiões, quase 10% delas foram erradamente classificadas como martita. Por outra parte, 1% destas regiões foram classificadas erradamente como microcristalina. Da mesma forma, na martita, de um total de 27399 regiões, 15% delas foram classificadas erradamente como compactas e quase 5% como microcristalina. Finalmente, na microcristalina, de um total de 21671 regiões, pouco menos do 1% delas foram classificadas erradamente como compactas e quase 16% como martita.

Tabela 5-2: Matriz de confusão para imagens *full frame*.

| Classes         | Compacta      | Martita       | Microcristalina | Total |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-------|
| Compacta        | 46076 (89,3%) | 5021 (9,7%)   | 498 (1,0%)      | 51595 |
| Martita         | 4118 (15,0%)  | 22022 (80,4%) | 1259 (4,6%)     | 27399 |
| Microcristalina | 172 (0,8%)    | 3398 (15,7%)  | 18101 (83,5%)   | 21671 |

Para imagens *subframe* (Tabela 5-3) a matriz de confusão mostrou que no caso da hematita compacta, de um total de 51713 regiões, quase 10% delas foram erradamente classificadas como martita e pouco mais de 1% destas regiões foram classificadas erradamente como microcristalina. Da mesma forma, na martita, de um total de 27401 regiões, 12% delas foram classificadas erradamente como compactas e pouco mais do 5% como microcristalina. Finalmente, na microcristalina, de um total de 21684 regiões, pouco menos do 1% delas foram classificadas erradamente como compactas e pouco mais de 16% como martita.

Tabela 5-3: Matriz de confusão para imagens *subframe*.

| Classes         | Compacta      | Martita       | Microcristalina | Total |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-------|
| Compacta        | 45842 (88,6%) | 5135 (9,9%)   | 736 (1,4%)      | 51713 |
| Martita         | 3288 (12,0%)  | 22671 (82,7%) | 1442 (5,3%)     | 27401 |
| Microcristalina | 162 (0,7%)    | 3570 (16,5%)  | 17952 (82,8%)   | 21684 |

Para imagens *subframe* saturadas (Tabela 5-4) a matriz de confusão mostrou que no caso da hematita compacta, de um total de 51714 regiões, quase

10% delas foram erradamente classificadas como martita e pouco mais de 1% destas regiões foram classificadas erradamente como microcristalina. Da mesma forma, na martita, de um total de 27401 regiões, 10% delas foram classificadas erradamente como compactas e quase 5% como microcristalina. Finalmente, na microcristalina, de um total de 21684 regiões, pouco menos do 1% delas foram classificadas erradamente como compactas e quase 16% como martita.

Tabela 5-4: Matriz de confusão para imagens *subframe* saturadas.

| Classes         | Compacta      | Martita       | Microcristalina | Total |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-------|
| Compacta        | 46097 (89,1%) | 4949 (9,6%)   | 668 (1,3%)      | 51714 |
| Martita         | 2743 (10,0%)  | 23409 (85,4%) | 1249 (4,6%)     | 27401 |
| Microcristalina | 186 (0,9%)    | 3400 (15,7%)  | 18098 (83,5%)   | 21684 |

Para imagens *subframe* saturadas NLM (Tabela 5-5) a matriz de confusão mostrou que no caso da hematita compacta, de um total de 51714 regiões, 8% delas foram erradamente classificadas como martita e menos de 1% destas regiões foram classificadas erradamente como microcristalina. Da mesma forma, na martita, de um total de 27401 regiões, pouco mais de 17% delas foram classificadas erradamente como compactas e 12% como microcristalina. Finalmente, na microcristalina, de um total de 21684 regiões, pouco menos de 1% delas foram classificadas erradamente como compactas e quase 17% como martita.

Tabela 5-5: Matriz de confusão para imagens *subframe* saturadas NLM.

| Classes         | Compacta      | Martita       | Microcristalina | Total |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-------|
| Compacta        | 47486 (91,8%) | 4113 (8,0%)   | 115 (0,2%)      | 51714 |
| Martita         | 4782(17,5%)   | 19344 (70,6%) | 3275 (12,0%)    | 27401 |
| Microcristalina | 132 (0,6%)    | 3601 (16,6%)  | 17951 (82,8%)   | 21684 |

A Figura 5-5 ilustra os dados da matriz de confusão para martita, que é fortemente afetada pelas condições de aquisição/filtragem. Também é interessante notar que as diferentes condições de aquisição/filtragem pouco afetaram os resultados para microcristalinas e compactas. Sem a filtragem NLM, existe uma tendência de confundir martita com hematitas compactas, com valor decrescente (15%, 12%, 10%) para *full frame*, *subframe*, *subframe* saturada, respectivamente. No entanto, a aplicação do filtro NLM aumenta este valor aumenta para 17,5% e, simultaneamente, ocorre um aumento da confusão com microcristalina (que cresce de  $\approx 5\%$  para 12%).

A explicação mais plausível é que na aplicação do filtro NLM, por um lado, as martitas se tornem mais homogêneas e se assemelhem às hematitas compactas, e por outro lado, as martitas mais porosas fiquem similares à microcristalina, que também é parcialmente borrada pelo filtro NLM.

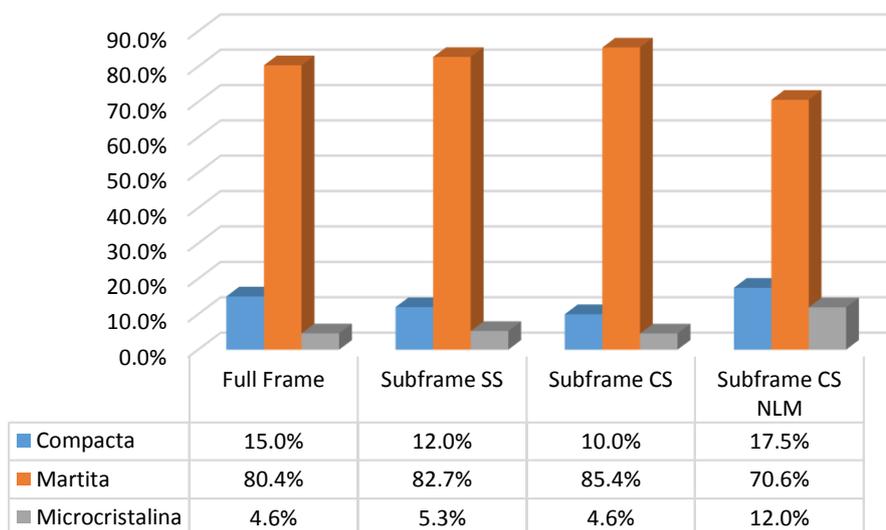


Figura 5-5: Representação da matriz de confusão para martita.

Contudo, os resultados obtidos para a classificação nas 4 condições de captura foram bons. Taxas de acerto globais próximas a 85% foram obtidas para a validação cruzada.

#### 5.4. Análise Qualitativa do Método Analítico

Para poder fazer uma melhor comparação dos resultados da rotina de classificação nos 4 tipos de aquisição/filtragem de imagens CPOL. Embora esta análise tenha sido realizada para os 6 mosaicos capturados, aqui se escolheu arbitrariamente um fragmento de imagem. Os demais apresentaram comportamento bastante semelhante.

Como pode ser observado na Figura 5-6 o melhor resultado é apresentado nas imagens CPOL obtidas com *subframe*, saturadas e filtradas com o filtro NLM. Nestas condições de captura a separação entre os cristais é superior, assim como também é maior o número de cristais detectados.

Por exemplo, na Figura 5-6a pode ser observada a identificação e classificação da rotina na imagem *full frame*. Neste caso alguns cristais não são

reconhecidos e outros são aglomerados em um só cristal grande, quando em realidade são cristais diferentes. Isto provavelmente se deve à perda de informação sofrida pela imagem *full frame* após a correção de fundo.

Por sua vez, a Figura 5-6b apresenta a identificação e classificação da rotina na imagem *subframe*. Neste caso, consegue-se identificar um maior número de cristais do que na condição *full frame*. Isto confirma a hipótese de que a correção de fundo reduziu o contraste entre os cristais, prejudicando sua identificação. Contudo, alguns cristais ainda não foram identificados.

A Figura 5-6c apresenta a identificação e classificação da rotina na imagem *subframe* saturada. Neste caso, a maioria dos cristais sofreu uma maior erosão, levando até ao desaparecimento de algumas regiões. Provavelmente, este comportamento se deve ao aumento do ruído na imagem saturada, o que dificulta o processo de crescimento de regiões.

Finalmente, a Figura 5-6d apresenta a identificação e classificação da rotina na imagem *subframe*, saturada e filtrada com o filtro NLM. Neste caso foi possível reconhecer um maior número de cristais, sendo a identificação mais acertada quando comparada com as condições de aquisição mencionadas anteriormente. Neste caso a erosão das partículas também foi menor.

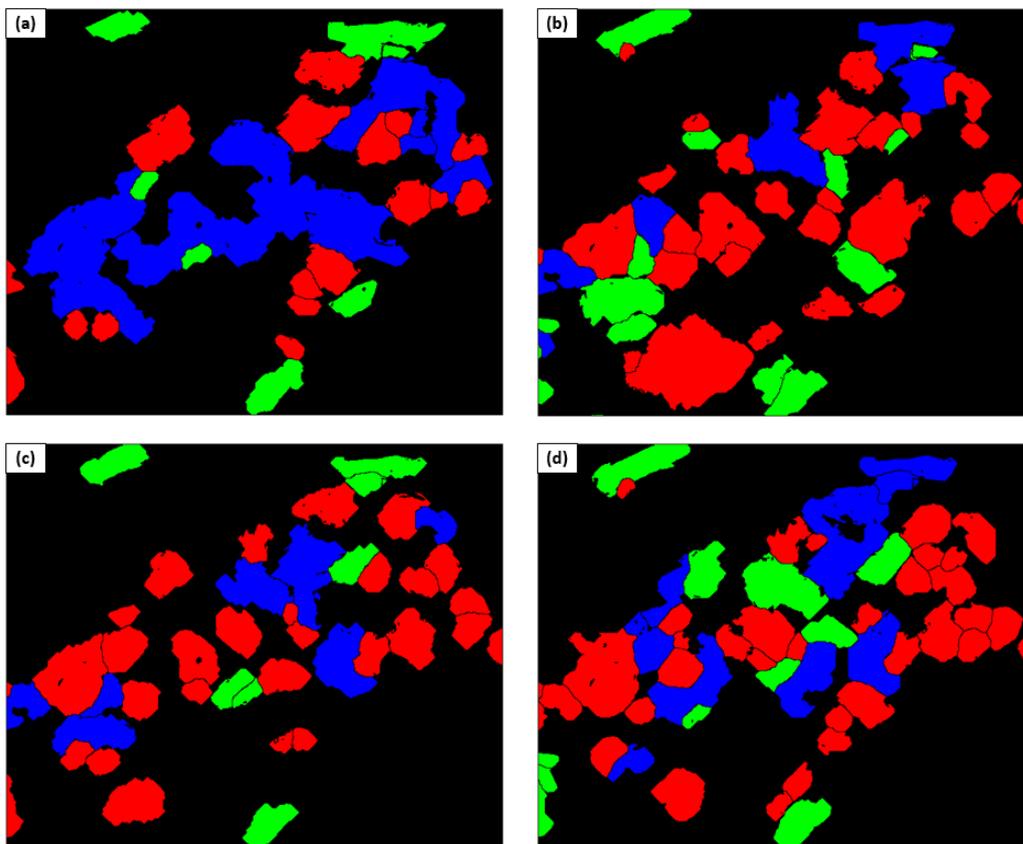
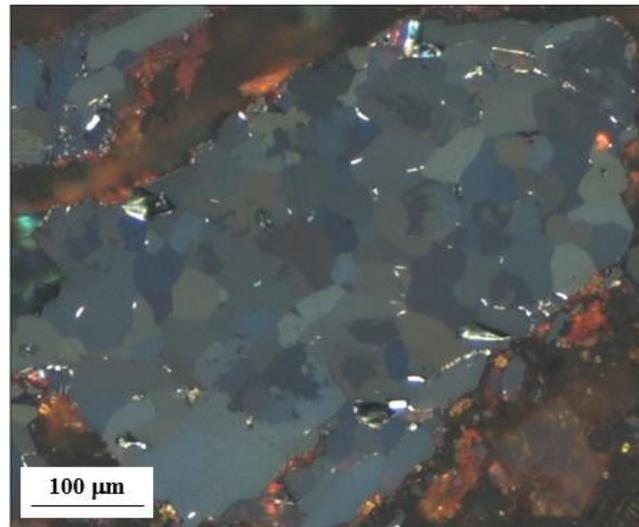


Figura 5-6: Exemplo de Identificação de cristais em função das variações da imagem CPOL. (a) CPOL *full frame*; (b) CPOL *sub frame*; (c) CPOL *subframe saturada*; (d) CPOL *subframe saturadas NLM*.

## 5.5. Análise Quantitativa dos Resultados

Na Tabela 5-6 pode-se observar os resultados de fração de área para os diferentes tipos de hematita, obtidos tanto pelo método sintético, quanto pelo método analítico. Ao mesmo tempo, na Tabela 5-7 pode-se observar a contagem de partículas obtida pelo método analítico. Em ambas as tabelas, se faz a comparação entre os diferentes métodos de captura estudados. Embora esta análise tenha sido realizada para os 6 mosaicos capturados, aqui se escolheu arbitrariamente um fragmento de imagem. Os demais apresentaram comportamento bastante semelhante.

Analisando a fração de área da hematita compacta na Tabela 5-6 pode-se observar que no caso do método analítico este valor (CoA) aumenta conforme mudamos o método de captura, com a única exceção do *subframe* saturado. Neste caso, o valor é bem menor (24,3%), coerente com o observado na seção anterior, onde era visível que os cristais sofriam uma forte erosão neste método de captura.

Na verdade, no processo de crescimento de regiões do método analítico, os cristais sempre sofrem erosão. No entanto, no caso do *subframe* saturado esta perda é maior do que o esperado. O que acontece é que com a saturação da imagem, além de aumentar o contraste entre as partículas, o ruído também aumenta, prejudicando a correta identificação dos cristais. Já quando o filtro NLM é aplicado à imagem *subframe* saturado, este ruído é eliminado, reduzindo o efeito de erosão dos cristais. Esta característica também pode ser confirmada comparando as frações de hematita compacta entre os métodos sintético (CoS) e analítico (CoA) (Figura 5-8). Nas condições *subframe* e *subframe* saturado NLM a fração CoA se aproxima mais da fração CoS, indicando menos perda da área de cristais na etapa de crescimento de regiões.

Tabela 5-6: Fração de área das hematitas (%), para as 4 condições de aquisição CPOL.

| Mosaico 1             | Método Analítico |     |      |      | Método Sintético |      |     |      |        | CoA+NC |
|-----------------------|------------------|-----|------|------|------------------|------|-----|------|--------|--------|
|                       | Gr               | La  | Lo   | CoA  | CoS              | Ma   | Mi  | NC   | CoS+NC |        |
| Full frame            | 11,2             | 3,5 | 11,1 | 25,8 | 32,8             | 59,5 | 5,8 | 65,3 | 98,0   | 91,1   |
| Subframe              | 14,2             | 6,3 | 12,0 | 32,4 | 34,7             | 56,5 | 6,8 | 63,3 | 98,0   | 95,7   |
| Subframe saturada     | 12,4             | 3,8 | 8,1  | 24,3 | 35,9             | 55,6 | 6,5 | 62,1 | 98,0   | 86,4   |
| Subframe saturada NLM | 18,0             | 6,5 | 12,1 | 36,7 | 39,3             | 49,6 | 9,1 | 58,7 | 98,0   | 95,4   |

Gr=Granular, La=Lamelar, Lo=Lobular, CoA=Compacta obtida pelo método analítico (Gr+La+Lo), CoS=Compacta obtida pelo método sintético, Ma=Martita, Mc=Microcristalina, NC=Não compacta (Ma+Mc).

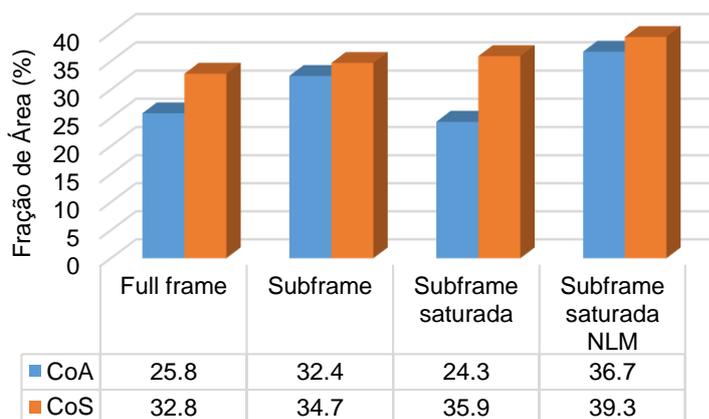


Figura 5-7: Comparação entre as frações de hematita compacta obtidas pelos métodos sintético e analítico para o Mosaico 1.

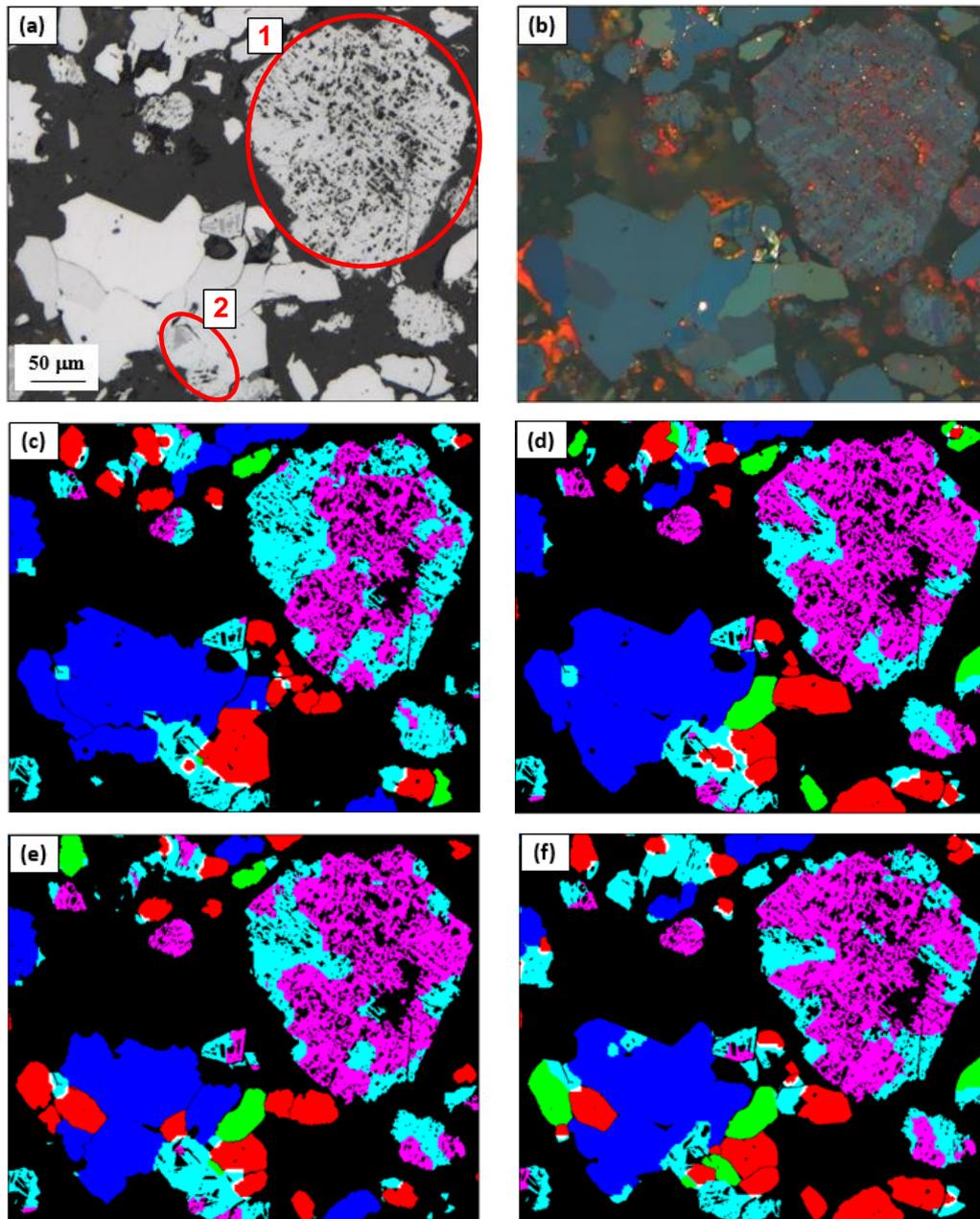
Por outro lado, da Tabela 5-7 pode-se observar que o número de partículas detectadas pelo método *subframe* com saturação e NLM é significativamente maior do que nas demais condições. Isto confirma o fato de que neste método a identificação dos cristais é melhor, confirmando o que tinha sido observado na seção anterior.

Tabela 5-7: Contagem de partículas, para as 4 condições de aquisição CPOL.

| Mosaico 1              | Método Analítico |     |     |       |
|------------------------|------------------|-----|-----|-------|
|                        | Gr               | La  | Lo  | Total |
| Full frame             | 682              | 162 | 149 | 993   |
| Subframe               | 744              | 255 | 155 | 1154  |
| Subframe saturadas     | 726              | 167 | 127 | 1020  |
| Subframe saturadas NLM | 1063             | 305 | 210 | 1578  |

Finalmente, das imagens apresentadas na Figura 5-8 para as 4 condições de aquisição numa região de um mosaico se pode respaldar os resultados quantitativos mencionados anteriormente. No caso da hematita compacta, a qualidade da identificação dos cristais aumenta para a imagem filtrada. Ao mesmo tempo, este tipo de hematita sofre a menor erosão sob estas condições de aquisição/filtragem.

Por outro lado, quando a martita é muito porosa o classificador começa a confundi-la com a microcristalina. Isto pode ser observado na região “1” da Figura 5-8. Provavelmente isto acontece devido ao tamanho do *kernel* utilizado no método sintético (50x50 pixels). Sendo que quando a martita é muito porosa, o *kernel* não é o grande suficiente para abranger toda a informação necessária. Se observado a região “2” desta mesma figura, menos porosa que a região “1”, neste caso o classificador consegue identificar corretamente a martita, sem confundi-la com a microcristalina.



Vermelho= Granular, Verde= Lamelar, Azul= Lobular, Ciano= Martita,  
Magenta= Microcristalina

Figura 5-8: Imagens da Classificação de hematita. (a) Imagem CC; (b) Imagem CPOL (c) Imagem *full frame*; (d) Imagem *subframe*; (e) Imagem *subframe* saturada; (f) Imagem *subframe* saturada NLM.