

4

Resultados e Discussão

Os resultados do presente trabalho serão apresentados segundo a ordem cronológica em que foram obtidos.

4.1

Otimização do ângulo de polarização linear

Em testes preliminares, observou-se que o contraste entre os cristais de hematita variava segundo o ângulo entre polarizador/analizador (Figura 3.2). Deste modo, decidiu-se que o ângulo entre polarizador/analizador seria a primeira variável a ser testada. Este foi o objeto do artigo publicado pelo autor e seus orientadores que está disponível no Apêndice A.[65]

Os ângulos escolhidos foram $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 30^\circ$, para um total de 10 imagens por campo. As imagens obtidas com ângulos abaixo de 5° ficavam muito escuras, assim como as imagens acima de 30° ficavam muito claras, prejudicando em ambos casos o contraste entre os cristais.

Este procedimento foi realizado em 5 campos, obtendo um total de 50 imagens. Cada par de imagens LPOL foi automaticamente segmentado usando o método de CRM. Deste modo, foram identificados os cristais de hematita nas imagens correspondentes a cada ângulo.

Por outro lado, foram desenhados manualmente os contornos dos cristais de hematita, para cada campo. Assim, conseguiu-se uma segmentação manual dos cristais. Esta imagem serviu como referência para decidir qual ângulo favorecia uma melhor segmentação.

O primeiro teste realizado para identificar o ângulo ideal de captura foi uma simples contagem dos cristais identificados pelos métodos manual e automático (Tabela 4.1). Assim, o erro relativo entre os valores das contagens manual e automática apresentou o mesmo comportamento nos 5 campos. Destacando que, quanto maior o ângulo, pior a identificação dos cristais. Porém, se o ângulo menor passava de um certo limite, a identificação dos cristais piorava consideravelmente. Provavelmente isto é causado pela forte absorção que sofre a luz para ângulos pequenos ($\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\theta)$). Ao mesmo

tempo, o menor erro relativo correspondia ao ângulo de 10° em cada um dos 5 campos, sendo 6,6% seu valor máximo.

Tabela 4.1: Otimização do ângulo de polarização.[65]

Campo	Contagem manual	Ângulo	Contagem automática	Erro relativo (%)
1	189	5	138	27,0
		10	183	3,2
		15	174	7,9
		20	168	11,1
		30	160	15,3
2	325	5	251	22,8
		10	315	3,1
		15	298	8,3
		20	275	15,4
		30	269	17,2
3	290	5	184	36,6
		10	271	6,6
		15	262	9,7
		20	250	13,8
		30	227	21,7
4	325	5	232	28,6
		10	308	5,2
		15	257	20,9
		20	235	27,7
		30	170	47,7
5	216	5	146	32,4
		10	205	5,1
		15	192	11,1
		20	171	20,8
		30	159	26,4

4.1.1

Análise dos Cristais

Deste modo ficou claro qual era o melhor ângulo a ser usado (10°) na captura das imagens LPOL e o próximo passo era avaliar quão eficiente seria o método de segmentação desenvolvido (CRM). Para isto, foram realizadas medidas de região nas imagens capturadas com o ângulo de 10° . Deste modo, as medidas obtidas sobre as imagens automaticamente segmentados foram comparadas com as mesmas medidas feitas sobre as imagens manualmente segmentadas (Tabela 4.2).

Especificamente, as medidas realizadas foram: Área, *feret* máximo, *feret* mínimo e razão de aspectos. Os valores mínimos, médios e máximos destas medidas podem ser observados na Tabela 4.2. Assim, apesar de algumas

Tabela 4.2: Comparação entre os resultados da segmentação automática e manual dos cristais de hematita.[65]

Campo	Medida	Mínimo Auto [†]	Mínimo Manual [†]	Máximo Auto	Máximo Manual	Médio Auto	Médio Manual	(99% IC) [†]
1	Área (μm^2)	8,35	7,23	7270,84	7272,78	517,22	517,06	Não
	F_{max} (μm)	4,50	4,54	207,88	207,88	32,23	33,12	Não
	F_{min} (μm)	3,04	2,64	73,49	73,49	17,51	17,82	Não
	RA	0,24	0,24	0,90	0,89	0,60	0,58	Não
2	Área (μm^2)	8,90	8,35	83715,34	83715,34	1724,04	1700,36	Não
	F_{max} (μm)	4,54	4,50	430,27	430,27	53,68	54,44	Não
	F_{min} (μm)	2,81	2,64	272,19	272,19	28,69	28,99	Não
	RA	0,15	0,09	0,92	0,92	0,58	0,57	Não
3	Área (μm^2)	7,23	20,59	63545,94	63594,35	1838,47	2022,52	Não
	F_{max} (μm)	4,02	6,52	502,07	393,51	54,30	62,55	Não
	F_{min} (μm)	2,64	4,75	240,37	240,37	26,97	30,30	Não
	RA	0,18	0,19	0,89	0,89	0,56	0,55	Não
4	Área (μm^2)	7,79	22,82	39351,28	37895,72	1309,13	1561,48	Não
	F_{max} (μm)	4,25	7,45	457,07	451,91	44,82	54,19	Não
	F_{min} (μm)	2,64	4,75	143,12	143,12	24,97	30,19	Sim
	RA	0,19	0,21	0,94	0,94	0,60	0,60	Não
5	Área (μm^2)	7,51	11,69	19340,48	18494,30	1408,73	1680,78	Não
	F_{max} (μm)	3,84	5,97	295,76	290,96	47,26	58,01	Não
	F_{min} (μm)	2,64	2,18	154,56	184,10	23,31	27,78	Não
	RA	0,23	0,12	0,87	0,88	0,57	0,52	Sim

[†] Auto: Resultados da segmentação automática; Manual: Resultados da segmentação manual; 99% IC: Diferença estatística entre Auto e Manual com um intervalo de confiança do 99%.

diferenças, de modo geral os resultados são muito semelhantes. Do ponto de vista estatístico (teste t de Student), não existem diferenças significativas dentro de um intervalo de confiança de 99% (99% IC), exceto para *feret* mínimo no campo 4, e razão de aspectos no campo 5.

A origem da discrepância no campo 4 pode estar relacionada a defeitos de preparação da amostra. A imagem da Figura 4.1 pertence ao campo 4 onde pode-se observar um arranhão (Figura 4.1a) causando a fragmentação dos cristais na imagem automaticamente segmentada (Figura 4.1b). Em contrapartida, durante a segmentação manual este risco foi eliminado e os cristais foram segmentados sem serem fragmentados (Figura 4.1c). Na verdade esta imagem é uma das regiões danificadas, em versão ampliada, da imagem original. O objetivo disto foi fazer visível em maior aumento o defeito na figura.

A Figura 4.2 mostra a distribuição do *feret* mínimo para as imagens segmentadas manual e automaticamente, correspondentes aos campos 1 e 4 respectivamente. Enquanto que para o campo 1 ambas as distribuições são muito semelhantes, para o campo 4 há uma diferença significativa no número

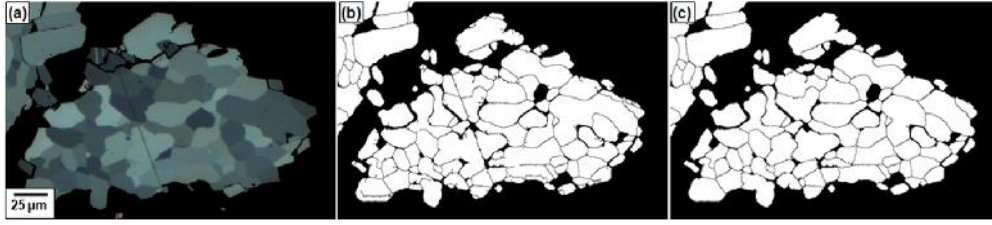


Figura 4.1: Possível causa da discrepância do *feret* mínimo no campo 4: (a) Imagem LPOL com arranhão; (b) Imagem automaticamente segmentada mantendo o arranhão e; (c) Imagem manualmente segmentada com arranhão eliminado.[65]

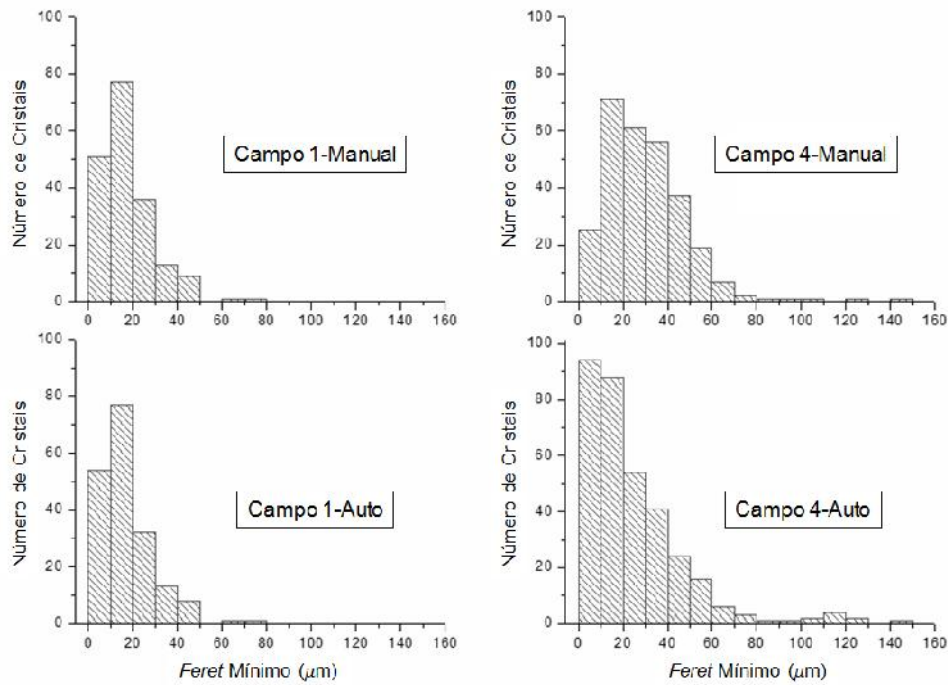


Figura 4.2: Distribuições do *feret* mínimo das segmentações manual e automática para os campos 1 e 4.[65]

de cristais pequenos. Pode-se observar que o número de cristais é bem menor para a segmentação manual que para a segmentação automática, justificando assim a discrepância do *feret* mínimo no campo 4.

Por outro lado, é importante mencionar que não foi possível fazer uma comparação 1-1 entre os cristais segmentados pelo método manual e automático. Isto se deve a que não só o número de cristais é diferente, tal como discutido acima, porém também a sequência de numeração é distinta já que a rotina de análise de imagem define autonomamente a ordem desta

sequência.

Finalmente, vale salientar que como a amostragem dos dados é pequena (apenas 5 campos) e a comparação está sendo feita sobre o resultado da segmentação manual, então justifica-se o uso do teste *t* de Student para procurar discrepâncias entre os resultados.

4.2

Comparação do CRM na segmentação de imagens CPOL com LPOL

Após ter demonstrado que o método de segmentação CRM é eficiente na separação dos cristais de hematita em imagens LPOL, o próximo passo foi comparar esses resultados com os obtidos sobre uma imagem CPOL. Segundo o observado na maioria das imagens, o resultado da segmentação usando uma imagem CPOL é ligeiramente superior ao resultado obtido sobre duas imagens LPOL (Figura 4.3).

A Figura 4.3 dá uma ideia da superioridade do método utilizando CPOL. Nesta figura mostra-se lado a lado, as imagens CPOL (Figura 4.3a) e LPOL (Figura 4.3b) originais, seguidas de suas respectivas segmentações (Figura 4.3c e 4.3d). Na Figura 4.3e, correspondente aos cristais segmentados da imagem CPOL, aparecem indicados por setas os cristais que foram erradamente segmentados usando duas imagens LPOL (Figura 4.3f).

O método CRM é sensível a poros, entalhes e arranhões ("concentradores de tensão"). Contudo, pode-se reparar que, o arranhão na parte inferior esquerda da imagem, afetou mais o resultado do método na imagem LPOL.

Embora ambos os resultados consigam identificar os cristais com bastante eficiência, é bom apontar outra falha do método que está relacionada com a erosão que sofrem estes cristais após serem segmentados. Essas erosões manifestam-se nas bordas de poros interfronteiriços ou nas rachaduras dos cristais.

A explicação disto está em que a vizinhança desses poros fica com uma tonalidade mais baixa de que o resto do cristal. Assim, o valor da distância espectral calculada para esses pixels é maior que o limiar t da Equação (3-4), segregando esses pixels para fora do cristal. Se esses pixels tivessem uma semente, então eles poderiam se transformar em um novo cristal, caso contrario eles simplesmente não são segmentados e ocorrem as erosões.

Finalmente, o tempo de processamento médio (teste realizado num computador com 8 GB de RAM e processador Intel Core i7 870 a 2,93 GHz) deste método para uma imagem de 1292 X 968 pixel foi de 31 min para as imagens CPOL e de 16 min para imagens LPOL. Pode-se estranhar que o tempo de processamento da rotina nas imagens CPOL seja maior que

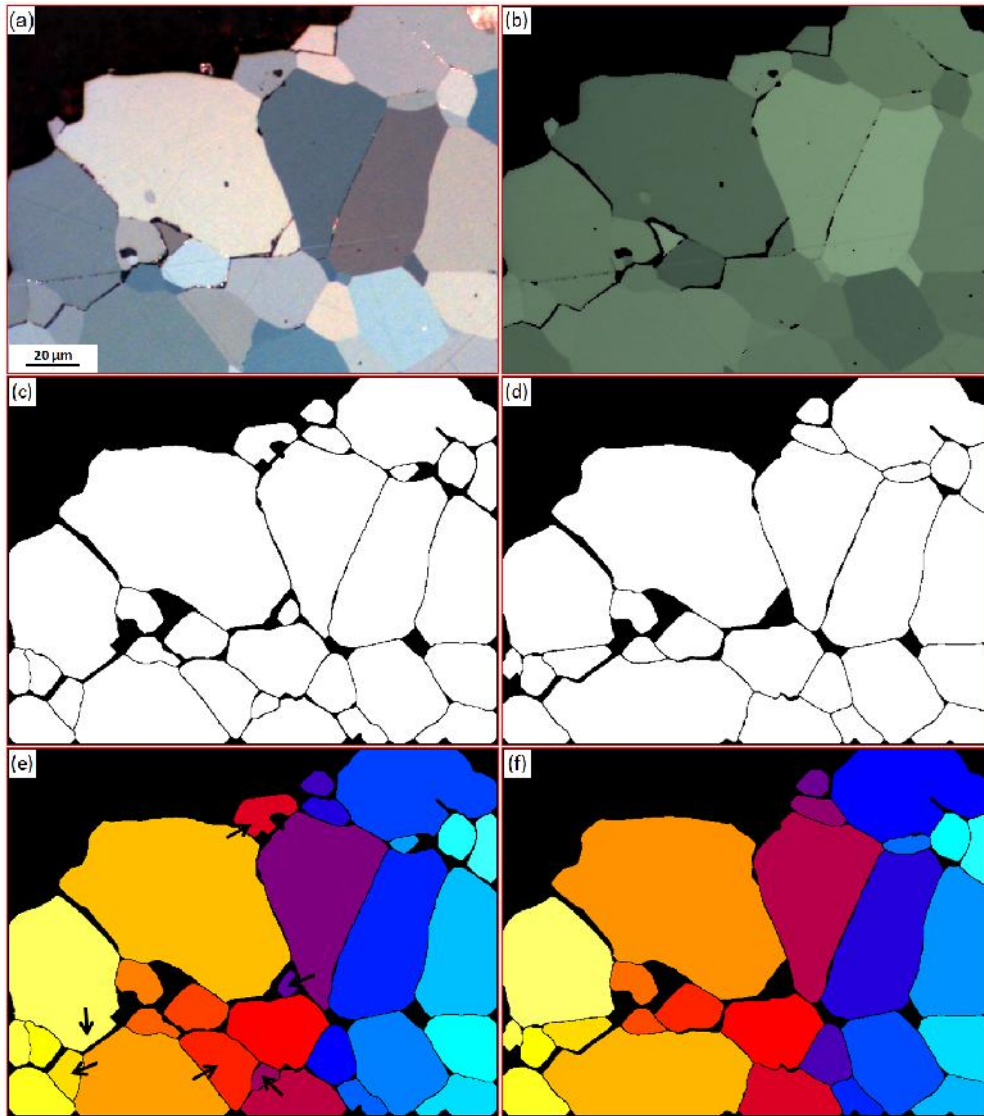


Figura 4.3: Comparação CPOL - LPOL: (a) Imagem CPOL original; (b) Imagem LPOL original; (c) Imagem CPOL segmentada; (d) Imagem LPOL segmentada; (e) Imagem CLUT dos cristais CPOL e; (f) Imagem CLUT dos cristais LPOL.

nas LPOL. Embora o cálculo da distância espectral nas imagens CPOL seja realizado apenas numa imagem (teoricamente consumiria a metade do tempo que nas duas imagens LPOL), acontece que a imagem CPOL gera muito mais sementes devido à riqueza de seu contraste.

Para se ter uma ideia, a imagem semente testada no caso CPOL teve um total de 14962 sementes, enquanto, no caso LPOL o número de sementes foi de apenas 4438. Já o tempo de processamento da rotina na imagem LPOL, usando as sementes geradas na imagem CPOL, foi de 62 min, exatamente como esperado.

Quanto maior a quantidade de sementes, melhor será o resultado da segmentação. Contudo, esta é uma relação custo-benefício a ser cuidadosamente avaliada, já que o tempo de processamento gasto pode ser contraproducente. Assim, as rotinas devem ser otimizadas ao máximo para diminuir o tempo de processamento. E é claro que o *hardware* também influencia diretamente no tempo de processamento.

É bom salientar que, embora este método seja um pouco demorado para um setor de análise da qualidade de uma empresa de mineração, ele é completamente automático, permitindo ao operador rodar a rotina para um conjunto de imagens e continuar realizando outras tarefas. Por sua vez, futuras modificações serão feitas nesta rotina, visando o uso da GPU da placa gráfica juntamente à CPU, assim como usufruir da tecnologia de núcleos múltiplos através de processamento em paralelo.

4.2.1

Análise dos Cristais

Embora visualmente seja possível perceber (Figura 4.3) que o método CRM é ligeiramente superior sobre imagens CPOL que sobre imagens LPOL, seria conveniente demonstrá-lo graficamente. Para isto foram medidos todos os cristais de hematitas segmentados em cada tipo de imagem (CPOL e LPOL). As medidas realizadas foram: Área, *feret* máximo, *feret* mínimo e razão de aspectos (Equação (2-50)). Na Tabela 4.3 estão representados os valores mínimo, médio e máximo destas medidas.

Tabela 4.3: Comparação entre os resultados das medidas dos cristais segmentados pelo método CRM nas imagens CPOL e LPOL.

Método	Total Cristais	Medida	Mínimo	Máximo	Médio
CRM-CPOL [†]	8935	Área (μm^2)	16,86	21387,54	543,02
		F_{max} (μm)	5,45	229,25	31,98
		F_{min} (μm)	2,48	138,48	17,37
		RA	0,11	0,93	0,59
CRM-LPOL [†]	7985	Área (μm^2)	17,03	19853,01	602,28
		F_{max} (μm)	5,30	228,93	33,37
		F_{min} (μm)	1,64	138,48	18,02
		RA	0,09	0,93	0,58

[†] CRM-CPOL: Resultados da segmentação CRM nas imagens CPOL; CRM-LPOL: Resultados da segmentação CRM nas imagens LPOL.

Pode-se notar que o número de cristais segmentados nas imagens CPOL (8935 cristais) é superior ao segmentado nas imagens LPOL (7985 cristais).

Este resultado faz sentido já que as imagens CPOL apresentam um contraste superior. Os valores, nas imagens LPOL, são ligeiramente menores justamente por não estar separando adequadamente todos os cristais.

4.2.2

Análise das classes

Na seção anterior foram analisados todos os cristais segmentados em cada tipo de imagem (CPOL e LPOL). Porém, o objetivo agora é analisar o comportamento das classes (Granular, Lamelar e Lobular) de hematita segmentadas em ambos os tipos de imagens. Estas classes foram inicialmente identificadas manualmente por um operador humano treinado.

Os valores máximo, médio e mínimo das medidas, realizadas sobre cada tipo de imagem, estão representados na Tabela 4.4. Além disso, foram criados histogramas do *feret* mínimo (Figura 4.4) e do *feret* máximo (Figura 4.5) de cada classe para cada tipo de imagem.

Tabela 4.4: Resultado das medidas dos cristais segmentados pelo método CRM nas classes de hematita para CPOL e LPOL.

Classe	Medida	Mínimo CPOL [†]	Mínimo LPOL [†]	Máximo CPOL	Máximo LPOL	Médio CPOL	Médio LPOL
Granular	Área (μm^2)	42,14	42,14	7014,47	15345,58	306,53	335,60
	F_{max} (μm)	8,18	7,98	119,68	178,43	21,06	22,08
	F_{min} (μm)	5,23	5,34	86,25	120,48	14,95	15,56
	RA	0,49	0,49	0,93	0,93	0,72	0,71
Lamelar	Área (μm^2)	42,14	42,14	8591,90	8579,09	503,20	525,11
	F_{max} (μm)	10,57	10,41	175,93	176,75	35,86	36,53
	F_{min} (μm)	4,27	3,48	73,48	90,13	14,95	15,11
	RA	0,11	0,11	0,71	0,70	0,44	0,43
Lobular	Área (μm^2)	46,78	46,19	21159,80	18521,10	1156,40	1549,52
	F_{max} (μm)	11,59	12,40	228,77	227,00	51,11	58,86
	F_{min} (μm)	6,36	6,77	137,90	137,90	29,45	34,09
	RA	0,25	0,24	0,91	0,88	0,59	0,60

[†] CPOL: Resultados da segmentação CRM nas imagens CPOL; LPOL: Resultados da segmentação CRM nas imagens LPOL.

Para o caso particular do *feret* mínimo (Figura 4.4) pode-se notar que os histogramas referentes às classes granular e lamelar, em ambos os tipos de imagens, apresentam um comportamento similar.

Em contrapartida, no caso particular da classe lobular, observa-se uma grande diferença na faixa de 10 a 20 μm . Por ser mais porosa, a hematita lobular é a classe mais difícil de segmentar entre as hematitas compactas. Além disso, geralmente apresenta fronteiras menos definidas que as hematitas granular

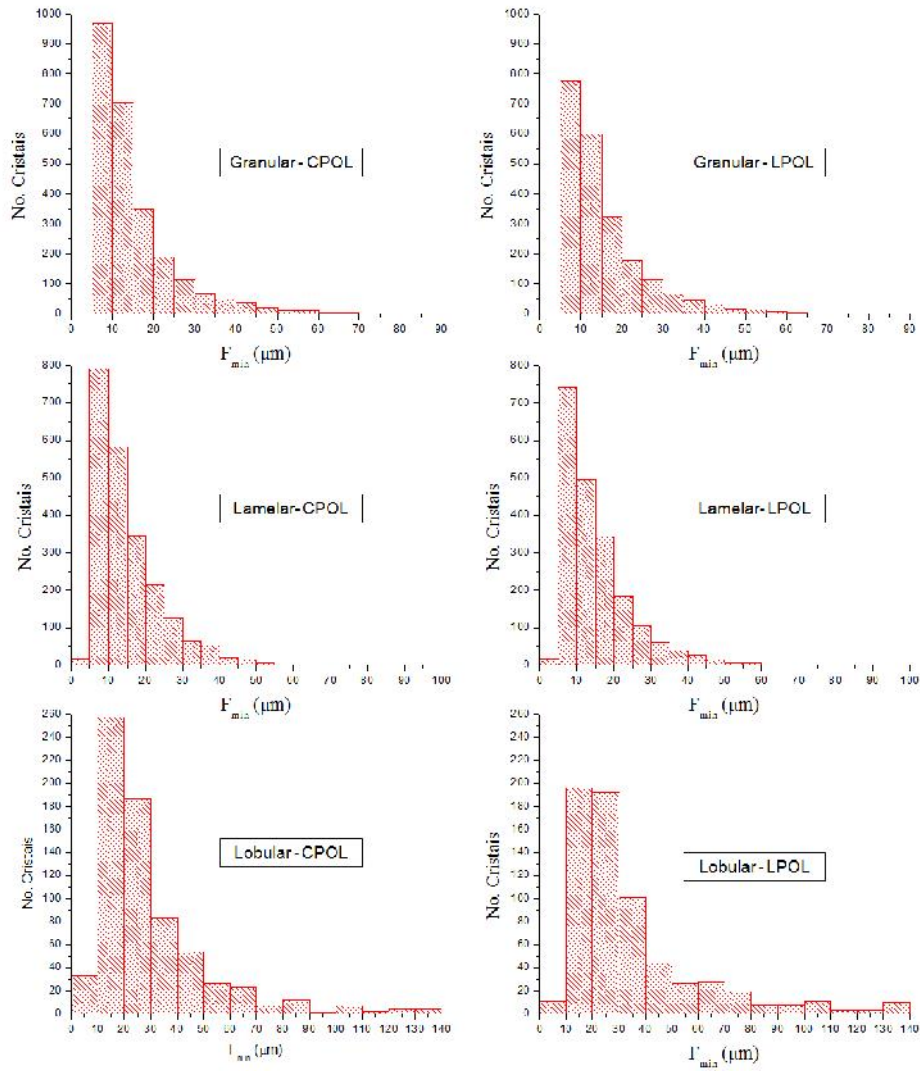


Figura 4.4: Histogramas referente ao *feret* mínimo dos cristais segmentados pelo método CRM nas classes de hematita para CPOL e LPOL.

e lamelar. Assim, não é de estranhar que alguns cristais lobulares menores não tenham sido corretamente segmentados nas imagens LPOL, tornando-se cristais maiores.

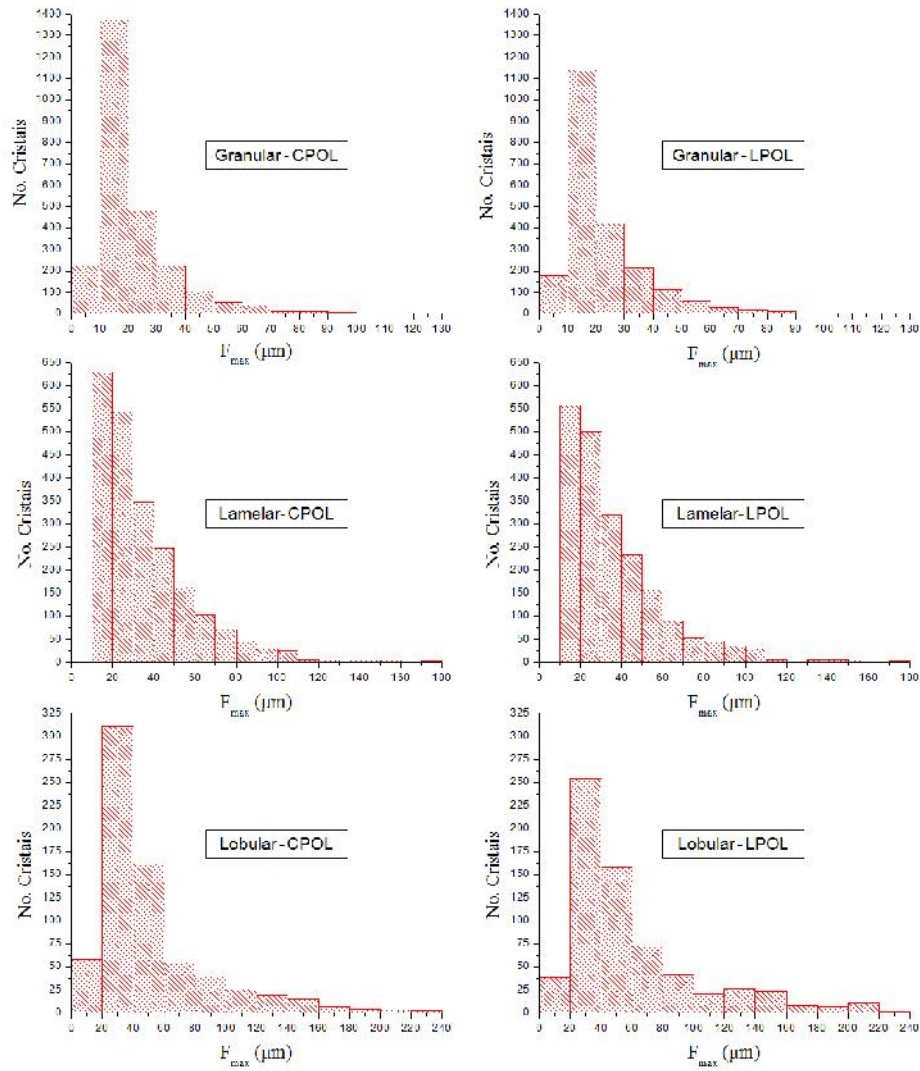


Figura 4.5: Histogramas referente ao *feret* máximo dos cristais segmentados pelo método CRM nas classes de hematita para CPOL e LPOL.

A Figura 4.5 mostra os histogramas correspondentes ao *feret* máximo. Para o *feret* máximo, os histogramas referentes às três classes são similares.

4.3

Comparação do método CRM com CW

Os resultados da segmentação obtidos pelo método CW foram comparados com os resultados da segmentação CRM nas imagens CPOL. Deste modo, podemos observar na Figura 4.6 os resultados dos dois métodos lado a lado.

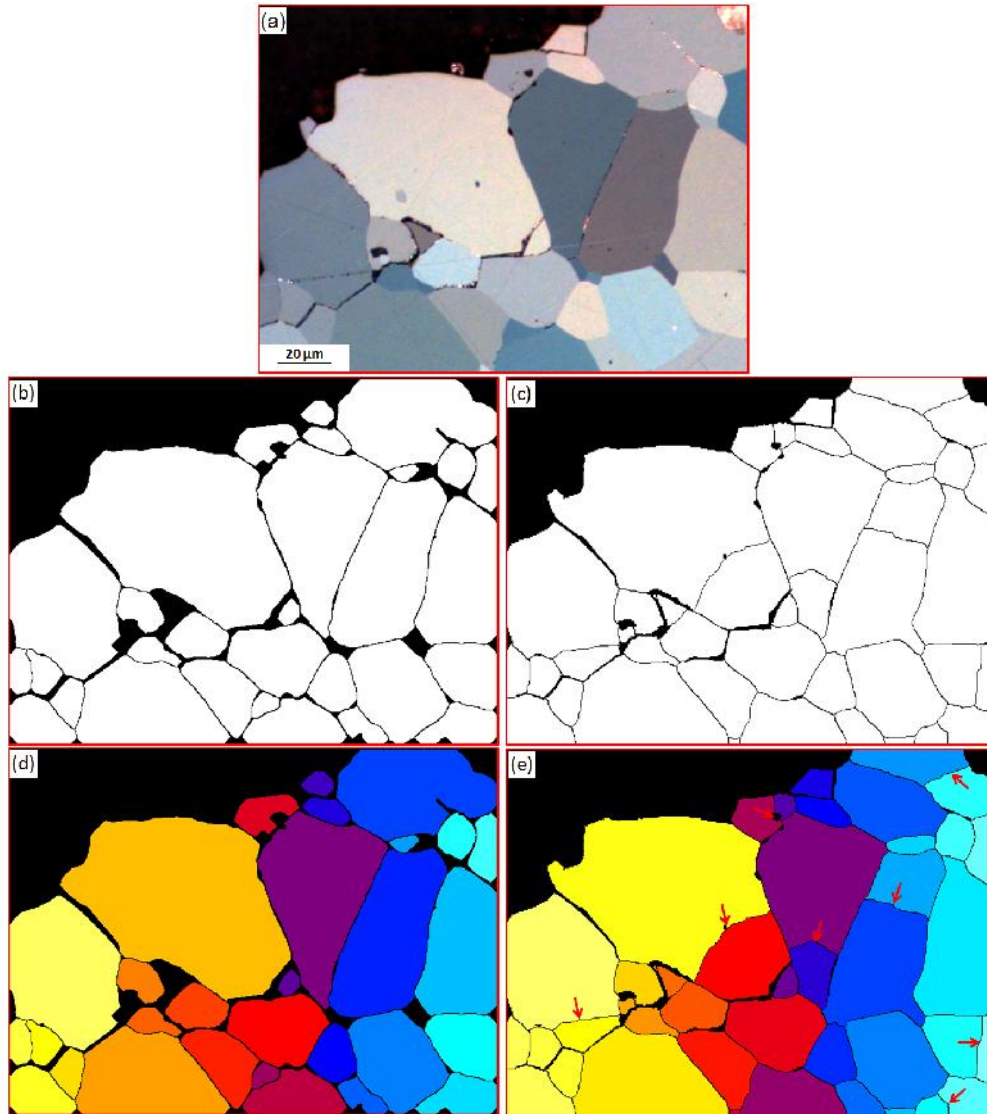


Figura 4.6: Comparação dos cristais obtidos por CW com os obtidos por CRM: (a) Imagem CPOL original; (b) Cristais segmentados pelo CRM; (c) Cristais segmentados pelo CW; (d) Cristais segmentados pelo CRM com CLUT e; (e) Cristais segmentados pelo CW com CLUT.

A Figura 4.6a mostra a imagem CPOL original, seguida da sua segmentação por CRM (Figura 4.6b). À direita desta imagem, encontra-se o resultado da segmentação por CW (Figura 4.6c). Embaixo dos resultados da

segmentação, mostram-se estes mesmos resultados com uma CLUT aplicada (Figura 4.6d e 4.6e) para ajudar na visualização dos cristais.

Na imagem dos cristais segmentados pelo CW foram desenhadas setas (Figura 4.6e) para mostrar os erros de segmentação deste método. Como pode ser notado, os cristais segmentados por este método foram muito fragmentados quando comparados com os cristais segmentados pelo método CRM.

A fragmentação dos cristais é o principal ponto negativo deste método. A causa principal deste problema é a sensibilidade que ele tem com cristais alongados ou com cristais com algum tipo de "concentrador de tensão" (poros, entalhes, mudanças abruptas nas bordas, arranhões, etc). Esta sensibilidade é bem maior que a sofrida pelo método CRM.

Por sua vez, o principal ponto positivo do método é que ele erode menos os objetos que o método CRM. Outro ponto positivo do método CW é sua leveza em termos de processamento. Quando comparado com o método CRM, ocorre uma diminuição drástica do tempo de processamento. Em comparação com os 31 min necessários para o método CRM, o método CW requer menos do que 1 min.

O problema da fragmentação dos cristais pelo método CW tem uma solução implementada. Porém, esta solução abre mão da velocidade do processamento e da total automação do método.

Esta solução consiste em usar a função do Axiovision chamada *Binary Image Editor* a qual permite editar *in-situ* as imagens segmentadas pelo CW. Desta forma, com um simples traço do mouse conseguem-se "soldar" os fragmentos do cristal. Porém, esta solução acaba com a automação do método.

Como esta "soldagem" consiste de um simples traço, o cristal fica com os remanescentes das fronteiras falsas. Isto gera um novo problema, já que estas fronteiras falsas poderiam afetar as medidas que dependem do perímetro.

Para resolver este novo problema foi criada outra rotina que percorre cristal por cristal em toda a imagem e faz um fechamento euclidiano eliminando todas as fronteiras falsas até recuperar por completo cada cristal da imagem. Porém, esta rotina é demorada acabando com a vantagem de velocidade do método.

Deste modo, apesar das vantagens do método CW, de forma geral, o método CRM é superior por enquanto. É bom salientar que este método ainda está em fase de aperfeiçoamento. Futuras soluções automáticas estão sendo estudadas e serão postas em praticas em trabalhos futuros. Assim, a solução manual ao problema do CW não foi utilizada neste trabalho devido ao enorme esforço que requereria processar manualmente um grande número de imagens.

4.3.1

Análise dos Cristais

Todos os cristais das imagens CPOL, segmentados pelo método CW, foram medidos. Os resultados das medidas feitas por este método foram comparados com os obtidos pelo CRM.

Os valores mínimo, máximo e médio destas medidas podem ser observadas na Tabela 4.5. Pode-se notar que o número de cristais segmentados pelo método CW (10674) é muito superior ao segmentado pelo CRM (8935).

Tabela 4.5: Comparação entre os resultados das medidas dos cristais segmentados pelos métodos CRM e CW nas imagens CPOL.

Método	Total Cristais	Medida	Mínimo	Máximo	Médio
CRM-CPOL [†]	8935	Área (μm^2)	16,86	21387,54	543,02
		F_{max} (μm)	5,45	229,25	31,98
		F_{min} (μm)	2,48	138,48	17,37
		RA	0,11	0,93	0,59
CW-CPOL [†]	10674	Área (μm^2)	16,86	9860,09	371,17
		F_{max} (μm)	5,33	153,51	27,41
		F_{min} (μm)	2,17	96,81	15,51
		RA	0,05	0,93	0,59

[†] CRM-CPOL: Resultados da segmentação CRM nas imagens CPOL; CW-CPOL: Resultados da segmentação por CW nas imagens CPOL.

Neste caso particular, não pode ser usado o argumento da superioridade do contraste já que ambos os métodos foram aplicados sobre imagens CPOL. Na realidade, o que está acontecendo é o que já tinha sido mostrado na seção anterior, o problema da fragmentação dos cristais. Se comparados os valores médios das áreas na Tabela 4.5, pode-se ver uma diferença de quase 32% entre os valores. Isto é mais um reflexo da subdivisão de cristais.

Até aqui foram indicados alguns problemas do método CW, que levantam dúvidas sobre a qualidade dos dados após ter feito a escolha forçada de renunciar à correção manual dos cristais. Estas suspeitas poderão ser esclarecidas na comparação dos histogramas, pertencentes às medidas das classes, obtidas pelos métodos CRM e CW.

4.3.2

Análise das classes

Na Tabela 4.6 podem ser observados os valores mínimo, máximo e médio das medidas feitas sobre as classes para os métodos CRM e CW. Neste caso a diferença das médias das áreas entre os dois métodos cresceu ainda mais,

sendo aproximadamente 30% para a granular, 44% para a lamelar e chegando até o 90% para a lobular.

Tabela 4.6: Resultado das medidas dos cristais segmentados pelos métodos CRM e CW nas classes de hematita para CPOL.

Classe	Medida	Mínimo CRM [†]	Mínimo CW [†]	Máximo CRM	Máximo CW	Médio CRM	Médio CW
Granular	Área (μm^2)	42,14	16,86	7014,47	6350,28	306,53	215,82
	F_{max} (μm)	8,18	5,30	119,68	114,99	21,06	17,75
	F_{min} (μm)	5,23	3,19	86,25	85,81	14,95	12,99
	RA	0,49	0,45	0,93	0,94	0,72	0,73
Lamelar	Área (μm^2)	42,14	16,86	8591,90	6447,80	503,20	280,01
	F_{max} (μm)	10,57	6,62	175,93	134,88	35,86	25,71
	F_{min} (μm)	4,27	1,74	73,48	77,23	14,95	11,70
	RA	0,11	0,09	0,71	0,75	0,44	0,46
Lobular	Área (μm^2)	46,78	16,86	21159,80	2149,16	1156,40	121,65
	F_{max} (μm)	11,59	5,86	228,77	75,71	51,11	16,22
	F_{min} (μm)	6,36	2,90	137,90	47,32	29,45	10,40
	RA	0,25	0,24	0,91	0,92	0,59	0,65

[†] CRM: Resultados da segmentação CRM nas imagens CPOL; CW: Resultados da segmentação CW nas imagens CPOL.

Os histogramas do *feret* mínimo e do *feret* máximo, de cada classe e para cada método de segmentação, são apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

Para o caso particular do *feret* mínimo (Figura 4.7) pode-se notar que os histogramas referentes às classes granular e lamelar, em ambos métodos, apresentam uma diferença expressiva. Isto é produto da fragmentação, onde o número de cristais falsos formados pelo método CW é muito maior que o número de cristais segmentados pelo CRM.

Por outro lado, nos histogramas referentes à classe lobular, além da diferença de altura das colunas, observa-se que a grande maioria dos cristais está concentrada na faixa de 0 a 20 μm . Como já tinha sido comentado, uma das características da hematita lobular é sua porosidade. Além disto, a característica principal da hematita lobular é a sinuosidade de seu contorno, precisamente uma das causas, junto com a porosidade, que mais afeta o método CW.

Da mesma forma, a Figura 4.8 mostra os histogramas referentes ao *feret* máximo obtido para cada classe pelos métodos CRM e CW. Neste caso, são válidos os mesmos comentários feitos para o *feret* mínimo sobre o comportamento dos histogramas referentes às classes granular e lobular.

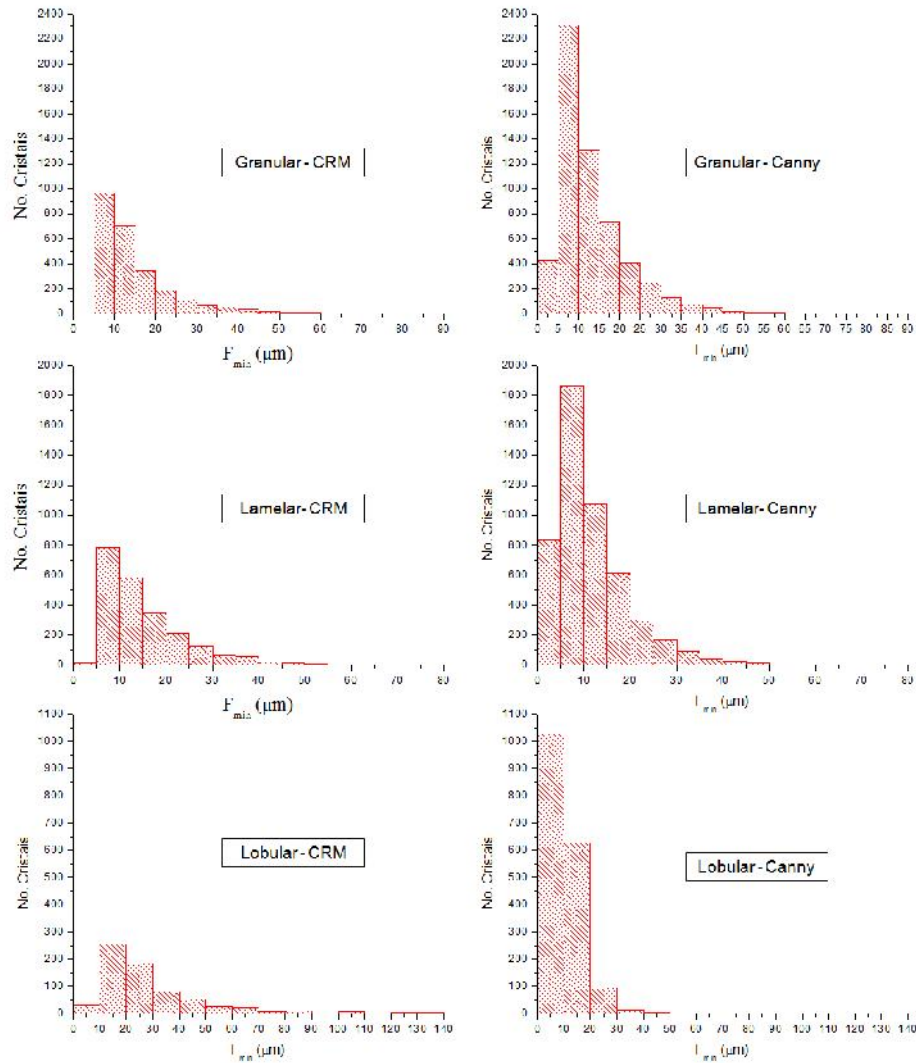


Figura 4.7: Histogramas referente ao *feret* mínimo dos cristais segmentados pelos métodos CRM e CW nas classes de hematita para CPOL.

Contudo, uma ressalva dever ser feita para o caso da classe lamelar. Pode-se observar que existe uma elevada concentração de cristais na faixa de 0 a 20 μm no histograma referente ao CW. Isto provavelmente se deve a que cristais lamelares maiores foram fragmentados virando lamelares menores ou, provavelmente, granulares.

Consciente das dificuldades apresentas por este método, como comentado anteriormente, o grupo de pesquisa está trabalhando para futuras modificações que permitam resolvê-las de forma automática. Este método, com a correção manual dos cristais, já foi implementado no setor de caracterização da Vale. O resto do desenvolvimento forma parte do cronograma futuro do projeto de

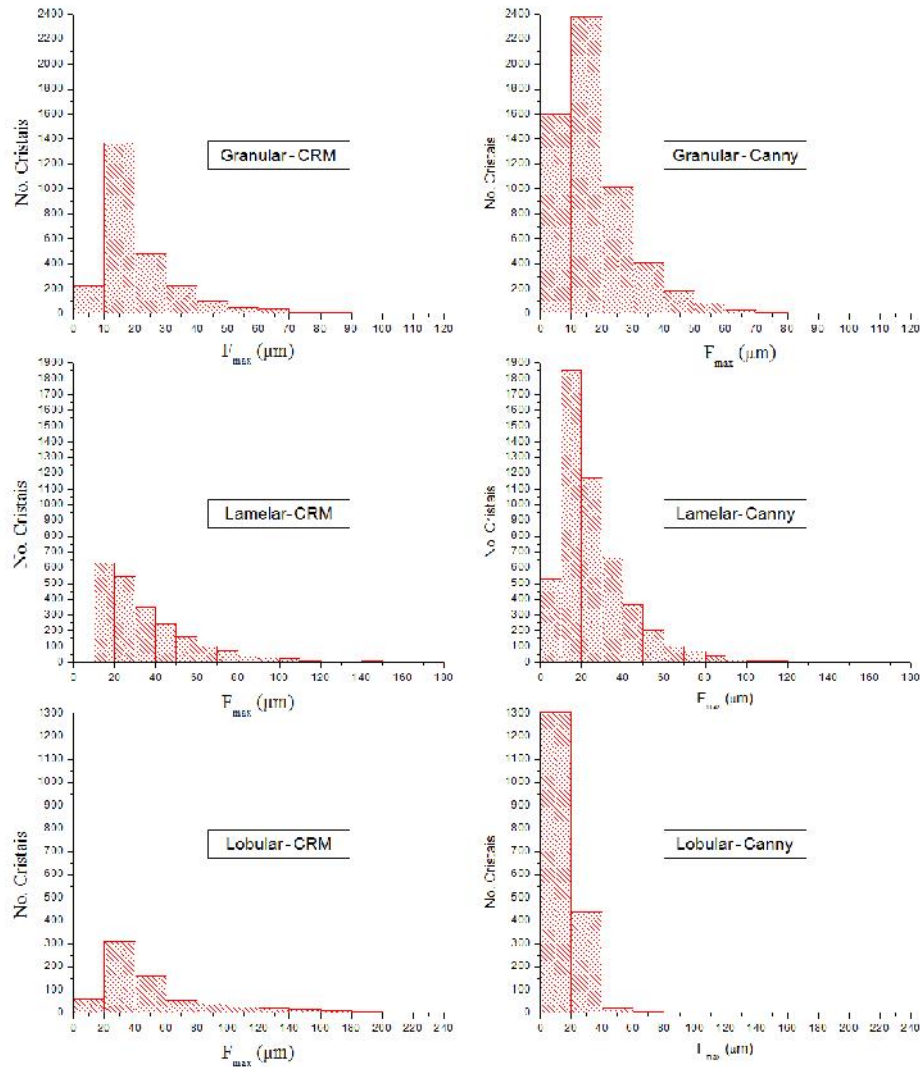


Figura 4.8: Histogramas referente ao *feret* máximo dos cristais segmentados pelos métodos CRM e CW nas classes de hematita para CPOL.

colaboração que o DEMa tem com a Vale e do qual faz parte esta tese.

O próximo passo deste trabalho seria classificar os cristais de hematita segmentados pelos métodos desenvolvidos sobre as imagens CPOL e LPOL. Contudo, os cristais segmentados pelo método de CW não serão classificados. Isto se deve à grande fragmentação que estes cristais sofreram, comprometendo a qualidade da identificação. Assim, carece de sentido classificar algo que ainda não é completamente representativo da realidade.

4.4

Classificação

O espaço de características, usado na classificação dos cristais nas imagens CPOL, baseou-se nas seguintes medidas de região:

- ▷ Razão de Aspectos (Equação (2-50));
- ▷ Fator de Forma Circular (Equação (2-51));
- ▷ Circularidade (Equação (2-52));
- ▷ Fator de Forma Circular Modificada (Equação (2-53));[118]
- ▷ Fator de Forma Circular de Grum (Equação (2-54));[119]
- ▷ Convexidade (Equação (2-55)) e;
- ▷ Solidez (Equação (2-56)).

Desta forma, as classes dos cristais segmentados pelo método CRM foram classificadas tanto para as imagens CPOL quanto para as imagens LPOL.

4.4.1

Classificação método CRM das imagens CPOL

Utilizando o espaço de características de 7 dimensões, classificou-se as três classes de hematita usando três tipos de classificador (Linear, Quadrático e Mahalanobis). Como pode ser observado na Tabela 4.7, primeiramente foi feita uma autovalidação seguida de uma validação cruzada.

Tabela 4.7: Classificação das classes nas, imagens CPOL segmentadas pelo método CRM, usando todos os atributos.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,26	93,52	94,04
	Lamelar	97,06	97,73	95,54
	Lobular	94,29	96,57	99,29
	Global	96,54	95,94	96,29
Validação Cruzada	Granular	98,26	93,70	94,03
	Lamelar	97,03	97,48	95,25
	Lobular	93,86	96,32	98,92
	Global	96,38	95,83	96,07

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

A autovalidação consiste em criar um banco de dados onde todos os objetos medidos foram previamente identificados. Desta forma, o classificador é

primeiramente treinado usando como variáveis o resultado do espaço de características e a pré-identificação. Uma vez treinado o classificador, o próximo passo é ele tentar classificar estes mesmos objetos. Este processo é realizado apenas uma vez.

Por outro lado, na validação cruzada o classificador é apenas treinado com a metade dos objetos. Uma vez treinado, ele tenta classificar a outra metade dos objetos. Este processo é repetido um grande número n de vezes, em cada uma delas empregando-se uma diferente partição. Desta forma, são realizadas n classificações com conjuntos de treinamento e validação diferentes, e o resultado final corresponde à média das taxas de acerto para cada combinação. Para o caso dos resultados mostrados nesta seção, o valor de n foi de 122841 vezes.

No caso da autovalidação a melhor taxa de acerto global foi para o classificador linear com 96,54%. De igual forma, para a validação cruzada a melhor taxa de acerto global também foi para o classificador linear com 96,38%.

Por outro lado, tentou-se reduzir a dimensionalidade do espaço de características. Uma das técnicas usadas para reduzir a dimensionalidade foi o PCA. Após testar para todas as possíveis dimensionalidades do PCA, chegou-se à conclusão de que o PCA de 5 componentes gerou a melhor taxa de acerto global. Assim, os valores da autovalidação e da validação cruzada obtidos para o PCA de 5 componentes são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Classificação das classes, nas imagens CPOL segmentadas pelo método CRM, usando PCA de 5 componentes.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,54	95,50	93,36
	Lamelar	97,10	98,13	95,68
	Lobular	94,00	96,86	99,29
	Global	96,55	96,83	96,11
Validação Cruzada	Granular	98,56	95,27	93,28
	Lamelar	97,03	97,80	95,39
	Lobular	93,79	96,74	99,23
	Global	96,46	96,60	95,97

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

No caso da autovalidação a melhor taxa de acerto global foi para o classificador quadrático com 96,83%. Da mesma forma, a melhor taxa de acerto global da validação cruzada também foi para o classificador quadrático com 96,60%.

Finalmente, também foi testada a redução da dimensionalidade usando FDA. Neste caso, a melhor taxa de acerto global foi para um FDA de 2

componentes. Os resultados da autovalidação e da validação cruzada para o FDA de 2 componentes são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Classificação das classes, nas imagens CPOL segmentadas pelo método CRM, usando FDA de 2 componentes.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,26	96,33	94,04
	Lamelar	97,06	97,95	97,73
	Lobular	94,29	99,14	99,14
	Global	96,54	97,81	96,97
Validação Cruzada	Granular	98,29	96,19	93,72
	Lamelar	97,04	97,90	97,76
	Lobular	94,00	99,03	99,12
	Global	96,44	97,71	96,87

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

A autovalidação teve como melhor taxa de acerto global o valor de 97,81% para o classificador quadrático. Da mesma forma, a validação cruzada teve como melhor taxa de acerto global o valor de 97,71%, também para o classificador quadrático.

De forma geral, o melhor resultado da classificação, como era de esperar, foi para a autovalidação. Esta autovalidação foi obtida usando uma redução da dimensionalidade do tipo FDA de 2 componentes. Analisando as Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9, podemos dizer que a melhor taxa global de acerto do PCA foi superior à melhor taxa global de acerto usando um espaço de características de 7 dimensões. Da mesma forma, a melhor taxa de acerto global para o FDA foi superior à do PCA.

Assim, conseguiu-se reduzir a dimensionalidade de 7 para 2 e ainda aumentar a taxa de acerto global. Provavelmente isto ocorreu porque ao diminuir a dimensionalidade aumenta a generalidade do sistema. O mesmo ocorreu para a validação cruzada, obtendo uma taxa global de acerto com FDA superior à obtida com PCA.

A Tabela 4.10 mostra a matriz de confusão obtida a partir da taxa global de acerto correspondente à autovalidação do classificador quadrático da Tabela 4.9. Esta matriz tem por objetivo identificar 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.

Note-se que no caso da granular 58 cristais foram erradamente classificados como lamelar e 35 cristais foram classificados como lobular, de um total

Tabela 4.10: Matriz de confusão da autovalidação do classificador quadrático.

Classes	Granular	Lamelar	Lobular	Total
Granular	2439	58	35	2532
Lamelar	17	2198	29	2244
Lobular	0	6	694	700
Total	2456	2262	758	5476

de 2532 cristais. Da mesma forma, para o caso da lamelar, 17 cristais foram classificados como granular e 29 como lobular, de um total de 2244 cristais. E finalmente, de um total de 700 cristais lobulares, apenas 6 cristais foram classificados erradamente, sendo todos confundidos pelo classificador como lamelar.

O fato de que a maioria dos cristais granulares, erradamente classificados, tenham sido confundidos com lamelares, poderia ter sido provocado pelo operador. Lembrando que para um cristal ser lamelar, tem que cumprir a seguinte condição: $RA < 0,5$, tornando difícil para um operador humano, simplesmente usando apreciação visual, acertar 100% das vezes. Contudo, os resultados obtidos para a classificação das classes pertencentes às imagens CPOL foram muito bons. Taxas de acerto globais próximas a 98% foram obtidas, tanto para a autovalidação, quanto para a validação cruzada.

4.4.2

Classificação método CRM das imagens LPOL

O mesmo procedimento de classificação usado para as imagens CPOL foi utilizado nas imagens LPOL. Assim, usando o espaço de características de 7 dimensões classificou-se as três classes de hematita. Nesta ocasião, se empregaram os mesmos três tipos de classificadores. Assim, primeiramente foi feita uma autovalidação seguida de uma validação cruzada. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.11, .

Para o caso dos resultados mostrados nesta seção, o número de vezes que a validação cruzada é repetida foi de 108568. Deste modo, a melhor taxa de acerto global na autovalidação foi para o classificador linear com 97,17%. De igual forma, para a validação cruzada a melhor taxa de acerto global também foi para o classificador linear com 97,10%.

Aqui, como no caso CPOL, os classificadores lineares tiveram as melhores taxas de acerto global. Sendo que neste caso, essas taxas de acerto foram ligeiramente melhores que no caso CPOL.

Novamente, como para CPOL, o PCA de 5 componentes gerou a melhor taxa de acerto para as imagens LPOL. Deste modo, os valores da autova-

Tabela 4.11: Classificação das classes nas, imagens LPOL segmentadas pelo método CRM, usando todos os atributos.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,18	93,49	94,95
	Lamelar	96,50	97,62	96,07
	Lobular	96,81	98,03	99,09
	Global	97,17	96,38	96,70
Validação Cruzada	Granular	98,08	93,30	94,87
	Lamelar	96,47	97,64	96,04
	Lobular	96,74	97,98	99,09
	Global	97,10	96,31	96,67

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

lidação e da validação cruzada obtidos para o PCA de 5 componentes estão representados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Classificação das classes, nas imagens LPOL segmentadas pelo método CRM, usando PCA de 5 componentes.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,59	95,13	94,63
	Lamelar	96,12	98,01	96,70
	Lobular	96,81	98,63	99,54
	Global	97,17	97,26	96,96
Validação Cruzada	Granular	98,49	95,00	94,55
	Lamelar	95,99	97,93	96,55
	Lobular	96,71	98,60	99,50
	Global	97,06	97,18	96,87

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

Mais uma vez, como para CPOL, a melhor taxa de acerto global da autovalidação foi para o classificador quadrático com 97,26%. Da mesma forma, a melhor taxa de acerto global para a validação cruzada também foi para o classificador quadrático com 97,18%. E novamente estas taxas de acerto são ligeiramente superiores às alcançadas nas imagens CPOL.

Finalmente, foi feito um teste para ver quantos componentes eram os mais indicados para o uso do FDA neste caso e o resultado foi o mesmo que para CPOL. Assim, na Tabela 4.13 podem ser observados os valores correspondentes à autovalidação e validação cruzada para o FDA de 2 componentes.

A autovalidação teve como melhor taxa de acerto global o valor de 97,77% para o classificador quadrático. Da mesma forma, a validação cruzada

Tabela 4.13: Classificação das classes, nas imagens LPOL segmentadas pelo método CRM, usando FDA de 2 componentes.

Técnicas de Validação	Classes	Linear TA(%) [†]	Quadrático TA(%)	Mahalanobis TA(%)
Autovalidação	Granular	98,18	95,90	93,62
	Lamelar	96,50	98,01	97,82
	Lobular	96,81	99,39	99,54
	Global	97,17	97,77	97,00
Validação Cruzada	Granular	98,14	95,83	93,53
	Lamelar	96,52	97,92	97,76
	Lobular	96,78	99,36	99,64
	Global	97,15	97,70	96,98

[†] TA(%): Taxas de Acerto em %.

teve como melhor taxa de acerto global o valor de 97,70%, também para o classificador quadrático. Desta vez, as taxas de acerto global para LPOL e CPOL foram praticamente as mesmas.

De forma geral, novamente o melhor resultado da classificação, como era de se esperar, foi para a autovalidação. Esta autovalidação foi obtida usando uma redução da dimensionalidade do tipo FDA de 2 componentes. Analisando as Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13, podemos novamente afirmar que a melhor taxa global de acerto do PCA foi superior à melhor taxa global de acerto usando um espaço de características de 7 dimensões. Da mesma forma, a melhor taxa de acerto global para o FDA foi superior à do PCA. Assim, conseguiu-se novamente reduzir a dimensionalidade de 7 para 2 e ainda aumentar a taxa de acerto global.

É bom destacar que até no uso do FDA as taxas de acerto da classificação para as imagens LPOL foram ligeiramente superiores às obtidas nas imagens CPOL. A explicação disto está em que o processo de reconhecimento das classes pelo operador começou pelas imagens CPOL. Desta forma quando tocou reconhecer as classes nas imagens LPOL o operador estava melhor treinado. Assim o conjunto de treinamento usado na classificação supervisionada das imagens CPOL induziu o classificador a errar em alguns cristais. Este erro foi diminuindo na medida em que o classificador foi mais eficiente.

Finalmente, como no caso CPOL, utilizou-se a melhor taxa de acerto global da autovalidação para criar a matriz de confusão. Deste modo, a matriz de confusão correspondente à autovalidação do classificador quadrático com FDA de 2 componentes pode ser observada na Tabela 4.14.

Pode-se notar na matriz de confusão que, de um total de 2196 cristais granulares, 54 foram classificados como lamelar, enquanto outros 36 cristais

Tabela 4.14: Matriz de confusão da autovalidação do classificador quadrático.

Classes	Granular	Lamelar	Lobular	Total
Granular	2106	54	36	2196
Lamelar	20	2019	21	2060
Lobular	0	4	655	659
Total	2126	2077	712	4915

foram classificados como lobular. Da mesma forma, de 2060 cristais lamelares, 20 foram classificados como granulares, enquanto outros 21 cristais foram classificados como lobular. E finalmente, no caso lobular apenas 4 cristais foram classificados erradamente como lamelar de um total de 659 cristais.

Igualmente ao que aconteceu com as imagens CPOL, a maioria dos cristais granulares, erradamente classificados, foram confundidos com lamelares. Neste caso, mesmo com o operador humano ainda mais treinado, foi impossível acertar em todos os casos. Contudo, os resultados obtidos para a classificação das classes pertencentes às imagens LPOL também foram ótimos. Taxas de acerto globais próximas ao 98% foram obtidas, tanto para a autovalidação, quanto para a validação cruzada.