

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Avaliação da Liberação Mineral por Análise de Imagens Digitais Obtidas em
Microscópio Ótico de Luz Refletida

Autor: Edgar Rodo Mantilla

Orientador: Roberto Galery

Fevereiro/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

AVALIAÇÃO DA LIBERAÇÃO MINERAL POR ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS
OBTIDAS EM MICROSCÓPIO ÓTICO DE LUZ REFLETIDA

Edgar Rodo Mantilla

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Roberto Galery

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2013

DEDICATÓRIA

A DEUS
e ao meu filho Caleb.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS pelas constantes bênçãos em minha vida.

A minha família.

Aos meus pais, Judy e Edgar, pelas constantes consultorias, orientações e ensinamentos não só para a execução do trabalho, mas também para a vida. A minha irmã Gina pela irmandade de tantos anos.

A Samarco e profissionais que apoiaram o desenvolvimento do trabalho, em especial a Heidy Oliveira pelo incondicional apoio e ensinamentos. A Maria da Conceição e Marcilene pelo suporte e execução dos testes. Ao Edmar dos Santos e Adair Eustáquio pela preparação das amostras. Ao João Paulo Costa e Luderson Gomes pela parceria em conhecimento e apoio. E ao Mauro Carvalho pelo incansável suporte.

Ao meu orientador Roberto Galery pelos ensinamentos e direcionamentos.

Ao Itamar Delbem pelo suporte nas discussões e sugestões.

Ao Alexsandro Silva e Fernando Silva da SGS Geosol pela execução dos testes.

E finalmente a todos os companheiros do Concentrador 2 de Germano pela convivência e amizade.

RESUMO

Este trabalho consiste na aplicação de uma rotina automática para a determinação do grau de liberação do quartzo em amostras de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. utilizando as técnicas de processamento e análise de imagens digitais obtidas via microscópio ótico de luz refletida. Atualmente, a Samarco utiliza o método tradicional de Gaudin para a avaliação do grau de liberação. Este método foi diagnosticado através de um teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade, e depois comparado a valores de grau de liberação estabelecidos como referência. Com isso, foi possível avaliar a exatidão e a precisão das análises do grau de liberação atualmente determinados pela Samarco. Foram desenvolvidas rotinas automáticas no software de processamento e análise de imagens que a Samarco tem licença de uso, o AxioVision, para a determinação do grau de liberação em amostras de minério de ferro da rotina Samarco. Com a comparação dos resultados da metodologia atual utilizada na determinação do grau de liberação e os valores de referência, foi possível avaliar que atualmente a metodologia utilizada atende as expectativas de precisão e exatidão das análises. Após a execução do teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade, mensurou-se que a influência de uma laboratorista em repetir a mesma medição contribui em 9,6% na variação total das análises, e a capacidade de diferentes laboratoristas em realizar a mesma medição contribui em 16,5% na variação total das análises, ou seja, com a aplicação do software de análise automática vislumbrou-se a possibilidade de ganhos em precisão na ordem de 26,1%, bem como reduzir o tempo médio das análises do grau de liberação. Com os resultados dos testes da rotina automática foi possível mensurar a redução do erro absoluto médio das análises em 82%, a redução da variabilidade das análises em 21% (eliminando a influência/subjetividade das laboratoristas na variação total das análises), a diminuição do tempo médio das análises em 77%, passando de 14min 26s para 3min 19s, e o aumento da correlação dos dados em relação aos valores de referência em 11%. Finalmente desde que se tenha um ambiente controlado e se mantenham as mesmas condições/parametrizações de aquisição das imagens, bem como as condições de preparação das seções polidas sejam as mesmas, têm-se ganhos significativos na aplicação das técnicas de processamento e análise de imagens digitais através de uma rotina automática para o cálculo do grau de liberação da Samarco Mineração S.A.

Palavras-chave

Análise de Imagens Digitais; Grau de Liberação; Microscopia Ótica; Minério de Ferro.

ABSTRACT

This work consists in the application of an automatic routine for determination of degree of liberation in Samarco Mineração S.A.'s iron ore routine samples through the use of digital image processing and analysis techniques obtained by reflected light optical microscope. Presently, the Gaudin traditional method is used by Samarco to evaluate the mineral liberation. A Repeatability & Reproducibility test was performed to evaluate this method and then compared with degree of liberation values established as reference. Therewith, it was possible to evaluate the accuracy and precision of mineral liberation analyses currently determined by Samarco. An automatic image processing and analysis routine was developed in the software AxioVision, which Samarco has license to use, for mineral liberation analyses of the routine samples of Samarco's iron ore. By comparing the results of current methodology used in determination of degree of liberation vs. the reference values, it was possible to evaluate that the current methodology meets the expectations of precision and accuracy of the analyses. With the Repeatability & Reproducibility test it was possible to measure the capacity of the laboratorist to repeat the same measurement contributes in 9.6% in the total analyses variation, and the capacity of different laboratorists in performing the same measurement contributes in 16.5% in the total analyses variation, in other words, was identified the possibility of gains in accuracy in order of 26.1% by using the automatic analysis software. With the automatic routine tests results it was possible to reduce the mean absolute error by 82%, reduce the analyses variability by 21% (nullifying the influence/subjectivity of laboratorians in total analyses variation), reduce the analyses average time by 77%, from 14min 26s to 3min 19s, and increase the data correlation against the reference values by 11%. Finally since a controlled environment is available, the same conditions/parameterizations of the images acquisition and the same conditions of polished sections preparation are kept, it's possible to obtain gains by the application of the digital images processing and analyses techniques through an automatic routine of determination of degree of liberation at Samarco Mineração S.A.

Keywords

Digital Image Analysis; Mineral Liberation; Optical Microscopy; Iron Ore.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
	2.1 Objetivo Geral	19
	2.2 Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
	3.1 Liberação Mineral	20
	3.1.1 Mineralogia de processo e a liberação	20
	3.1.2 Caracterização tecnológica de minérios e a liberação	22
	3.1.3 Liberação – conceito e aplicação na Samarco	23
	3.1.4 Flotação e a importância da liberação	27
	3.2 Microscopia Digital	29
	3.2.1 Microscópio ótico	30
	3.2.2 Tipos de preparação de amostras para observação em microscópio ótico	36
	3.3 Processamento e Análise de Imagens Digitais	38
	3.3.1 Aquisição e imagem digital	41
	3.3.2 Pré-processamento	45
	3.3.3 Segmentação	53
	3.3.4 Pós-processamento	56
	3.3.5 Extração de atributos, reconhecimento e classificação	59
	3.4 Repetibilidade & Reprodutibilidade	60
4	MATERIAIS E MÉTODOS	62
	4.1 Materiais e Equipamentos	62
	4.1.1 Descrição da preparação das seções polidas	62
	4.1.2 Prensa de embutimento automática	63
	4.1.3 Equipamento de polimento	64
	4.1.4 Microscópio ótico e câmera digital	64
	4.1.5 Software de análise de imagens	65
	4.1.6 Software de análise estatística	65

4.2 Métodos	66
4.2.1 Seleção das amostras e grau de liberação de referência	66
4.2.2 Determinação das fontes de variações e do tempo das medições do grau de liberação	67
4.2.3 Efeito da granulometria no grau de liberação da Samarco	68
4.2.4 Aquisição de Imagens	69
4.2.5 Processamento e análise de imagens digitais	70
4.2.6 Comparação de desempenho	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
5.1 Grau de Liberação de Referência	72
5.1.1 Comparação do grau de liberação de rotina e de referência	75
5.2 Determinação das Fontes de Variação e do Tempo das Medições do Grau de Liberação	79
5.2.1 Avaliação qualitativa	80
5.2.2 Avaliação quantitativa	83
5.2.2.1 Teste de hipótese para a medição do tempo	83
5.2.2.2 Teste de hipótese para as médias do grau de liberação	84
5.2.2.3 Teste de repetibilidade e reprodutibilidade	85
5.3 Efeito da granulometria no grau de liberação da Samarco	86
5.4 Aquisição das Imagens Digitais	87
5.5 Processamento e Análise de Imagens Digitais	88
5.5.1 Descrição das etapas e das técnicas utilizadas na rotina automática	88
5.5.2 Ganhos de exatidão	97
5.5.3 Ganhos de precisão	100
5.5.4 Ganhos com tempo das análises	102
5.5.5 Resumo dos ganhos	103
6 CONCLUSÕES	104
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
ANEXO	115

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 3.1 – Tipos de partículas mistas em sistema binário de minerais.	25
FIGURA 3.2 – Fluxograma do concentrador I da Samarco mostrando em círculos vermelhos os pontos de amostragem que geram o composto final para a análise do grau de liberação.	26
FIGURA 3.3 – Fluxograma do concentrador II da Samarco mostrando em círculos vermelhos os pontos de amostragem que geram o composto final para a análise do grau de liberação.	27
FIGURA 3.4 – Sistema de microscopia digital com aquisição e análise de imagens.	29
FIGURA 3.5 – Espectro eletromagnético destacando a faixa correspondente ao da luz visível.	31
FIGURA 3.6 – Principais características de uma onda eletromagnética.	31
FIGURA 3.7 – (a) Microscópio ótico de luz transmitida e (b) microscópio ótico de luz refletida.	32
FIGURA 3.8 – Fotomicrografia de duas imagens de cõndrulo com olivina + tetraedrita + kamacita adquiridas por microscópio de luz refletida e por um microscópio de luz transmitida.	33
FIGURA 3.9 – Componentes do microscópio ótico.	35
FIGURA 3.10 – Desenho esquemático da polarização da luz.	35
FIGURA 3.11 – Lâmina delgada polida.	37
FIGURA 3.12 – Seção polida.	38
FIGURA 3.13 – Sequência padrão de Processamento e Análise Digital de Imagens.	40
FIGURA 3.14 – Exemplo do processo de aquisição de imagem digital mostrando a projeção de uma cena em um plano.	42
FIGURA 3.15 – Imagem digital mostrando os pixels.	42
FIGURA 3.16 – Quatro figuras representando a variação da resolução e quantização de uma imagem digital.	43
FIGURA 3.17 – Imagem da esquerda em escala de cinza e imagem da direita binarizada.	44
FIGURA 3.18 – Figura representando o sistema de cor RGB.	45
FIGURA 3.19 – Figura de partículas de quartzo em uma seção polida. (a) imagem digital em escala de cinza; (b) histograma referente a imagem onde a abscissa representa a intensidade dos pixels e a ordenada o número de pixels.	46

FIGURA 3.20 – Exemplos de imagens e seus respectivos histogramas. (a) imagem escura, baixo brilho; (b) imagem clara, alto brilho; (c) imagem com baixo contraste; (d) imagem com alto contraste. _____	48
FIGURA 3.21 – Algumas aplicações da LUT. (a) a imagem de saída não sofre alteração; (b) o contraste nas regiões escuras é realçado; (c) o contraste nas regiões claras é realçado. _____	49
FIGURA 3.22 – Exemplo de expansão de contraste numa imagem e no histograma. _____	50
FIGURA 3.23 - Exemplo da aplicação de correção de fundo. _____	51
FIGURA 3.24 – Exemplo da aplicação do filtro de delineação. (a) imagem original; (b) imagem delineada. _____	52
FIGURA 3.25 – Aplicação do filtro passa-baixa e passa-alta. _____	53
FIGURA 3.26 – Exemplo de segmentação. (a) imagem original; (b) imagem binária; (c) limiar de corte no histograma. _____	54
FIGURA 3.27 – Exemplo de uma limiarização multimodal. _____	56
FIGURA 3.28 – Exemplo das aplicações das técnicas de erosão e dilatação. (a) Imagem original binária; (b) imagem erodida; (c) imagem dilatada. _____	57
FIGURA 3.29 – Exemplo de operação de preenchimento. (a) Imagem original; (b) imagem após a operação fill. _____	58
FIGURA 3.30 – Exemplo de aplicação da técnica Watershed. (a) Imagem original; (b) imagem após a aplicação do Watershed. _____	59
FIGURA 3.31 – Fluxograma mostrando a decomposição da variabilidade total. _____	61
FIGURA 4.1 – Foto da prensa de embutimento automática. _____	64
FIGURA 4.2 – Foto do equipamento de polimento. _____	64
FIGURA 4.3 – Foto do microscópio ótico de luz refletida e da câmera digital da marca Zeiss. _____	65
FIGURA 4.4 – Fluxograma com as etapas de execução para os testes de R&R. _____	68
FIGURA 4.5 – Fluxograma com as etapas de execução para o processamento e análise das imagens. _____	71
FIGURA 5.1 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 1, 2 e 3. _____	72
FIGURA 5.2 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 4,5 e 6. _____	73
FIGURA 5.3 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 7,8 e 9. _____	73

FIGURA 5.4 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 10,11 e 12. _____	74
FIGURA 5.5 – Gráfico sequencial com os valores do grau de liberação de rotina e de referência. _____	76
FIGURA 5.6 – Correlação entre os valores do grau de liberação de rotina e de referência. _____	76
FIGURA 5.7 – Boxplot do grau de liberação de rotina e de referência. _____	78
FIGURA 5.8 – Histograma do grau de liberação de rotina e de referência. _____	78
FIGURA 5.9 – Dispersão mostrando as medições realizadas pela laboratorista 1. ____	81
FIGURA 5.10 – Dispersão mostrando as medições realizadas pela laboratorista 2. _	81
FIGURA 5.11 – Dispersão mostrando as medições realizadas pelas laboratoristas 1 e 2. _____	82
FIGURA 5.12 – Boxplot com a média do grau de liberação das duas laboratoristas. _____	82
FIGURA 5.13 – Boxplot com a média de tempo das duas laboratoristas. _____	83
FIGURA 5.14 – Resultado gráfico do teste de R&R. _____	85
FIGURA 5.15 – Gráfico mostrando o comportamento do grau de liberação de diferentes faixas granulométricas. _____	87
FIGURA 5.16 – Imagem mosaico digitalizada da amostra 1, aumento de 100x. ____	88
FIGURA 5.17 – Principais técnicas de processamento e análise de imagens utilizadas na rotina automática. _____	89
FIGURA 5.18 – Aplicação do filtro sigma, aumento de 100x. (a) Imagem original; (b) imagem resultante. _____	89
FIGURA 5.19 – Aplicação da delineação das bordas, aumento de 100x. (a) Imagem original; (b) imagem resultante. _____	90
FIGURA 5.20 – Segmentação das bordas, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada. _____	90
FIGURA 5.21 – Segmentação do quartzo, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada. _____	91
FIGURA 5.22 – Aplicação da técnica Scrap para a retirada do fundo. _____	91
FIGURA 5.23 – Imagem processada do mosaico 12x12 com a identificação do quartzo. _____	92
FIGURA 5.24 – Imagem mosaico 12x12 com as partículas de quartzo livre. _____	93
FIGURA 5.25 – Imagem mosaico 12x12 das partículas mistas . _____	94
FIGURA 5.26 – Imagem com a identificação e contagem de partículas mistas. ____	95

FIGURA 5.27 – Imagem com a identificação e contagem de partículas livres de quartzo. _____	95
FIGURA 5.28 – Boxplot comparando a média dos resultados pelo software perante aos valores de referência. _____	97
FIGURA 5.29 – Gráfico sequencial do grau de liberação determinado pelo software e valores de referência. _____	98
FIGURA 5.30 – Correlação entre o grau de liberação do software e o grau de liberação de referência. _____	99
FIGURA 5.31 – Histogramas e desvios padrão dos resultados do software e de rotina. _____	100
FIGURA 5.32 – Resultado gráfico do teste de R&R. _____	101
FIGURA 5.33 – Boxplot com o tempo médio das análises do software e do método atual. _____	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 – Amostras selecionadas da rotina Samarco. _____	66
TABELA 4.2 – Resultados das amostras da rotina Samarco. _____	69
TABELA 5.1 – Valores de referência do grau de liberação das 12 amostras. _____	75
TABELA 5.2 – Resultado do grau de liberação e do tempo das análises. _____	79
TABELA 5.3 – Duplicata das análises do grau de liberação e do tempo. _____	80
TABELA 5.4 – Número de partículas analisadas pelo software de cada amostra. _____	96
TABELA 5.5 – Resumo dos ganhos com aplicação da rotina automática. _____	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADI – Análise Digital de Imagens

ANOVA – Analysis Of Variance

CCD – Charge Coupled Device

CMY – Cyan, Magenta e Yellow

DRX – Difração de Raios-X

EDS - Energy Dispersive Spectrometer

HSB – Hue Saturation Brightness

HSL – Hue Saturation Lightness

LUT - Look Up Table

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MLA - Mineral Liberation Analyzer

PADI – Processamento de Análise Digital de Imagens

PDI – Processamento Digital de Imagens

RGB – Red, Green e Blue

R&R – Repetibilidade e Reprodutibilidade

LISTA DE NOTAÇÕES OU SÍMBOLOS

l = grau de liberação fracional

g_{α} = índice fracional das partículas variando de 0 (ganga livre) a 1 (partícula do mineral livre)

D^* = tamanho da partícula condicionado a faixa [D_{min} ; D_{max}];

n = número de partículas de composição alfa.

λ = comprimento de onda

= mesh, número de aberturas existentes em uma peneira por polegada linear

σ^2 = variância

H_0 = hipótese nula

H_1 = hipótese alternativa

μ = média

1 INTRODUÇÃO

Frente aos minérios de compacidade cada vez maior, a indústria mineral de ferro tem encontrado desafios crescentes para obtenção de produtos competitivos e de qualidade. Neste cenário, a Samarco Mineração S.A. vem trabalhando para adaptar os seus processos, atuais e futuros, para tratar este tipo de material com o objetivo de um maior aproveitamento do recurso mineral.

Quando se diz compacidade, entende-se um minério mais duro, de maior dificuldade na quebra das partículas, ou seja, o minério necessita uma maior energia para reduzir o seu tamanho médio de partículas. Há três preceitos básicos e fundamentais no processamento de concentração mineral: a liberação do mineral de interesse do mineral não útil (ganga), a separabilidade dinâmica e a propriedade diferenciadora (PERES, 2007).

Na Samarco, a concentração do minério de ferro se faz por flotação reversa, ou seja, a hematita é o material afundado e o quartzo o flotado. Por sua vez, a liberação, alcançada através dos processos de cominuição (britagem e moagem), é calculada pelo método tradicional de Gaudin por microscopia ótica de luz refletida. Portanto, para que ocorra a concentração do mineral de interesse é necessário que as partículas estejam liberadas dando condições aos reagentes de entrar em contato com a superfície de cada mineral sujeitando a elas as características superficiais diferenciadoras.

Frente a este cenário, percebe-se a importância dos processos de cominuição para a obtenção de um grau de liberação aceitável, que permita um processo de flotação eficiente. Com valores baixos de grau de liberação, ocorrerá uma perda significativa na qualidade do concentrado da flotação, fazendo com que se tenham dificuldades nas obtenções das especificações de qualidade e metas de produção do concentrador.

A microscopia é um método analítico empregado largamente em diversas áreas do conhecimento como biologia, medicina, geologia, metalurgia, engenharia e mineração, sendo esta última em especial, na área de caracterização tecnológica e mineralogia de processos. No nível da tecnologia atual somado à necessidade de melhorar a assertividade das análises microscópicas, juntamente com a automatização das

mesmas, entra-se em um campo chamado microscopia digital, definido por Paciornik (2009, p. 7)¹ como sendo a “integração entre microscópio e computador oferecendo aquisição digital de imagens, automação do microscópio e análise de imagens”.

Alinhado a microscopia digital ingressasse em uma área importante e, de certa forma recente na indústria mineral, denominada processamento e análise de imagens digitais. Essa área é definida como sendo um conjunto de técnicas aplicadas na modificação de imagens digitais, a nível de pixels, visando obter informações quantitativas da amostra analisada. O objetivo desta técnica é basicamente melhorar a visualização da imagem e permitir a percepção automática de dados quantitativos das imagens digitais.

Na indústria mineral “as técnicas de análise de imagem são empregadas desde meados da década de oitenta em aplicações de monitoramento das dimensões do minério em correias transportadoras [...], extração de informações referentes à granulometria [...], classificação e beneficiamento do material” (OLIVEIRA, E., 2007, p. 1).

Embora o sistema de visão e interpretação humana seja excelente para reconhecer padrões de uma maneira qualitativa, o ser humano não é tão bom em interpretações quantitativas. Por exemplo, na hora de contar partículas em uma imagem ou estimar a forma e o tamanho de objetos quantitativamente, dependendo do número de amostras, se torna uma tarefa tediosa e menos precisa para o ser humano, dependendo fortemente de caráter subjetivo. “Por isso, desde o início da era digital, muitos esforços têm sido feitos para a aplicação dos computadores em tarefas de análise quantitativa de imagens, uma vez que, diferentemente dos humanos, as máquinas são excelentes para a contagem e medição de objetos” (RODENACKER, 2002, *apud* ROSA, 2008, p. 29-30).

Atualmente o resultado do cálculo do grau de liberação realizado na Samarco é utilizado pela equipe técnico-operacional da usina, bem como pelos engenheiros de processo e gestores. Essa informação é gerada diariamente e de fundamental importância para as parametrizações das variáveis de processo dos concentradores.

¹ www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf

Devido à constante necessidade de produção mais elevada e resultados cada vez mais rápidos nos concentradores da Samarco, surgem os desafios de buscar melhorias em precisão e exatidão das análises do grau de liberação, bem como uma maior rapidez na geração desses resultados, dando condições à equipe técnico-operacional da Samarco a agir de maneira mais eficiente na busca do aumento de desempenho dos concentradores.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Melhorar a precisão e a exatidão das análises do grau de liberação realizadas no laboratório de mineralogia da Samarco Mineração S.A. e diminuir o tempo na geração desses resultados.

2.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral proposto pretende-se:

- a) determinar as fontes de variações das medições do grau de liberação realizadas atualmente na Samarco;
- b) avaliar o procedimento atual de medição do grau de liberação;
- c) desenvolver rotinas para automatizar a análise do grau de liberação através de imagens digitais no software AxioVision;
- d) verificar a precisão e exatidão das análises realizadas pela rotina automática frente a técnica de referência;
- e) determinar e comparar os tempos de obtenção dos resultados do grau de liberação realizados pelas rotinas automáticas do software frente ao método atualmente utilizado na Samarco;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são descritos os principais assuntos envolvidos no trabalho. Conceituou-se inicialmente a liberação mineral, sua importância na mineralogia de processos e na caracterização tecnológica de minérios, bem como sua influência no processo de flotação.

A microscopia digital foi outro assunto abordado, sendo a microscopia ótica o método analítico mais aprofundado nesta seção.

Finalmente, descrevem-se sucintamente as principais técnicas e operações do processamento e análise de imagens digitais.

3.1 Liberação Mineral

Há três preceitos básicos e fundamentais no processamento de concentração mineral: a liberação do mineral de interesse do mineral não útil (ganga), a separabilidade dinâmica e a propriedade diferenciadora (PERES, 2007).

O conceito de liberação mineral baseia-se na relação dos minerais de interesse que se encontram livres dos minerais de ganga, ou vice-versa. Sendo que esta liberação é alcançada nas etapas de cominuição (britagem e moagem). A análise da liberação faz parte, basicamente, de dois segmentos na área de tecnologia mineral, a mineralogia aplicada ou mineralogia de processos e a caracterização tecnológica de minérios.

Para compreender melhor a importância da análise do grau de liberação nestas duas áreas, descrevem-se a seguir, sucintamente, suas principais funções.

3.1.1 Mineralogia de processo e a liberação

A mineralogia de processo na indústria mineral é a utilização das informações mineralógicas para entender e resolver problemas encontrados durante a lavra, no processamento de minérios (concentração), pelotização, na redução (alto-forno e redução direta) e outros processos relacionados.

“A evolução na mineralogia de processo aplicada industrialmente começou na metade da década de 1960 e modificou significativamente esse campo de trabalho” (PETRUK, 2000, p. v)². Esses conhecimentos deram subsídios aos engenheiros de processo para atuar no beneficiamento mineral com foco na qualidade, produção e maior recuperação metálica dos minerais de interesse. Atualmente algumas dissertações e teses tiveram alguma ligação com esse assunto como Henriques (2009)³, Rocha (2008) e Frick (2008). Trabalhos publicados, como Queiroz *et al.* (2003), enfatizam a aplicação destes conhecimentos pouco explorados e utilizados nos processos produtivos, visando otimização de reservas, novos procedimentos operacionais e aumento de performance das usinas de beneficiamento.

Petruk (2000) comenta que resultados de estudos mineralógicos relacionados a exploração são frequentemente utilizados para prever: localizações de depósitos de minério; potencial de recuperação de um determinado mineral, metal ou elemento; comportamento do minério na usina de beneficiamento.

Também Petruk (2000, p. 2)⁴ lista, de uma maneira geral, características do minério que precisam ser determinadas para a aplicação da mineralogia de processo:

- a) identificação das principais fases, fases de menor relevância e traços minerais;
- b) composição dos minerais que sustentam o processo;
- c) quantificação das fases minerais;
- d) distribuição de tamanhos de partículas e grãos;
- e) estrutura dos minerais;
- f) **liberação mineral;**
- g) recobrimento superficial dos minerais.

Na Samarco Mineração S.A., mais especificamente nos concentradores de Germano, utilizam-se vários resultados da mineralogia de processo para dar suporte à operação, buscando aumentar o desempenho da usina e resolver problemas que afetam a qualidade do concentrado. Quantificam-se diariamente na rotina de análises as seguintes fases minerais: hematita especular (especular + lamelar + granular), goethita, hematita porosa, magnetita e quartzo. E, como parte principal do presente

² Tradução da língua inglesa da obra de Petruk (2000, p. v)

³ www.pos.demet.ufmg.br/hpcpgem/diss_detalhes.asp?aluno=1373

⁴ Tradução da língua inglesa da obra de Petruk (2000, p. 2)

trabalho, é analisado também o grau de liberação do quartzo que será descrito em maiores detalhes na seção 3.1.3.

3.1.2 Caracterização tecnológica de minérios e a liberação

A outra vertente em que o grau de liberação é analisado e considerado de extrema importância é a caracterização tecnológica de minérios.

A informação gerada na análise do grau de liberação da mineralogia de processo fornece aos engenheiros subsídios para atuar em um sistema produtivo que já está consolidado, ou seja, em uma usina de beneficiamento que está operando e gerando receita para a empresa. A caracterização tecnológica aplica-se a um momento anterior a este, e envolve todos os estudos que englobam a identificação dos minerais baseados na composição química, estrutural, propriedades físicas, bem como suas quantificações. É uma etapa fundamental para o aproveitamento de um recurso mineral de forma otimizada, dando condições a geólogos, engenheiros e projetistas, dimensionarem os recursos e reservas minerais, estruturar a melhor rota de processo visando a maximização de reservas, geração de concentrados dentro das especificações de qualidade e processos com uma maior recuperação metálica do mineral útil.

Então, comparada com a mineralogia de processo, a caracterização tecnológica é uma metodologia mais específica, com análises a um nível de detalhamento mais aprofundado.

Para se alcançar a liberação ou individualização de um mineral é necessário cominuí-lo, ou seja, como no caso da Samarco, o minério precisa passar pelos processos de britagem e moagem. Existe a relação de que quanto menor o tamanho das partículas mais liberadas elas ficarão, mas há limites nessa relação porque a moagem é a etapa que mais consome energia elétrica em um concentrador, normalmente mais do que 50% do processo. Na Samarco a moagem responde por quase 80% do consumo de energia elétrica do concentrador I de Germano. Por outro lado, se a moagem do minério for excessiva ocorrerá maior geração de lama, ocasionando maior perda na etapa de deslamagem e diminuindo a eficiência da flotação, direcionando o mineral de interesse para o rejeito (no caso da Samarco), gerando assim um decréscimo na

recuperação metálica da planta. Como conclusão, a meta ao se dimensionar um processo ou uma rota, é avaliar o tamanho máximo da partícula que atenda a um grau de liberação aceitável para o método de concentração a ser utilizado, com economia em energia elétrica e evitando a geração de lamas que afetam negativamente o desempenho da planta.

Neumann; Scheneider; Neto (2004) afirmam que “de uma maneira geral, a caracterização de uma amostra é executada mais frequentemente em quatro estágios com forte interdependência entre si”:

- a) Fracionamento da amostra;
- b) Identificação das fases;
- c) Quantificação dos minerais;
- d) Liberação do mineral de interesse.

Este último é uma das informações mais importantes na caracterização tecnológica de minérios.

3.1.3 Liberação – conceito e aplicação na Samarco

Como mencionado anteriormente, para qualquer processo de concentração mineral faz-se necessária a liberação/individualização dos minerais de interesse aos minerais de ganga, tornando-se assim possível a separação entre eles por algum método de concentração.

Pode-se dividir o uso da informação do grau de liberação em duas áreas aplicativas descritas anteriormente, a caracterização tecnológica e a mineralogia de processo. A primeira exige uma análise mais aprofundada e detalhada do grau de liberação, pois as informações orientam cálculos de dimensionamento de equipamentos e rotas de processo, que exigem um investimento de capital elevado não permitindo erros de engenharia. Já o segundo, aplica-se em um concentrador já em operação dando subsídios a equipe operacional e engenheiros de processo a tomarem decisões objetivando o aumento de recuperação metálica, aumento de produção e cumprimento das metas de qualidade do concentrado.

Gaudin (1939, *apud* WILLS, 2006) foi o primeiro a desenvolver modelos para o cálculo de liberação. Outros pesquisadores também desenvolveram e quantificaram a liberação mineral (BARBERY, 1987) e (ANDREWS; MIKA, 1975; WIEGEL, 1976; KING, 1979; WEI; GAY, 1999, todos citados por STAMBOLIADIS, 2007). Há modelos desenvolvidos por King e Schneider (1993, *apud* PETRUK, 2000) e (1998) que levam em consideração a correção estereológica, ou seja, uma transformação de liberação areal/linear para volumétrica tridimensional.

Nos concentradores da Samarco Mineração S.A. analisa-se o grau de liberação pelo método tradicional de Gaudin através de um microscópio ótico, que é considerado um método simples e que já atende por fornecer informações indicativas se os minerais estão liberados ou não. Desta forma, a equipe da Samarco tem condições de avaliar as operações dos concentradores e possíveis dificuldades nos processos de moagem e, principalmente, na flotação.

O cálculo do grau de liberação pelo método de Gaudin é dado pela EQ. (3.1):

$$l(g_{\alpha} = 1 | D^*) = \frac{n(g_{\alpha} = 1 | D^*)}{\sum_{g_{\alpha}=0}^{g_{\alpha}=1} n(g_{\alpha} | D^*)} \quad (3.1)$$

onde:

l = grau de liberação fracional;

g_{α} = índice fracional das partículas variando de 0 (ganga livre) a 1 (partícula do mineral livre);

D^* = tamanho da partícula condicionado a faixa [D_{min} ; D_{max}];

n = número de partículas de composição alfa.

Para compreender melhor o conceito de partículas mistas, Silva (1973, *apud* VALADÃO; ARAUJO, 2007, p. 59) descreve quatro tipos básicos (FIG. 3.1).

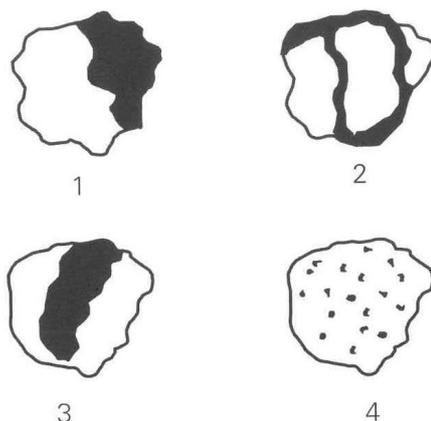


FIGURA 3.1 – Tipos de partículas mistas em sistema binário de minerais.

Fonte: Valadão; Araujo, 2007, p. 59.

O tipo 1 mostra espécies mineralógicas justapostas, havendo uma superfície de contato entre as mesmas. Sua forma indica que o material possa ter uma textura granular em que o tamanho dos grãos é maior que o desta partícula. A inclusão de uma espécie em outra, através de uma estrutura vesicular, é vista no tipo 2. A liberação dos constituintes é mais difícil, neste caso, quando comparada ao caso descrito anteriormente. No tipo 3, há o envolvimento de uma das espécies sobre a outra. A fragmentação posterior da partícula pode aumentar o grau de liberação, mas haverá um número expressivo de partículas que exigirão uma redução significativa em seu tamanho para a obtenção da liberação. A disseminação de uma das espécies na outra é a principal característica do tipo 4. A liberação dessas partículas é normalmente inviável, já que seria necessário fragmentar excessivamente o material, impossibilitando sua concentração por métodos físicos ou físico-químicos (VALADÃO; ARAUJO, 2007, p. 59).

Petruk (2000) afirma que uma análise em seção polida através de microscópio ótico já é o suficiente para avaliar se a maioria das partículas minerais está livre ou mista. Obviamente para um estudo mais detalhado e que demanda projetos de dimensionamento e rotas de processo, pode-se fazer necessário avaliar o grau de liberação por outras técnicas analíticas e outros modelos.

Nos dois concentradores de Germano é analisado diariamente o grau de liberação do quartzo na fração retida na malha 100# (0,15mm). São duas amostras diárias, uma

proveniente do concentrador I e outra proveniente do concentrador II. Cada amostra é analisada em um microscópio ótico de luz refletida em uma seção polida. A amostra do concentrador I é composta por quatro pontos de amostragem, FIG. 3.2, e a amostra do concentrador II é composta por dois pontos de amostragem (FIG. 3.3). Todos os pontos de amostragem estão localizados no overflow das baterias dos ciclones primários de seus respectivos circuitos, cujo material tem como característica aproximadamente 90% passante em massa na malha 100# (0,15mm).

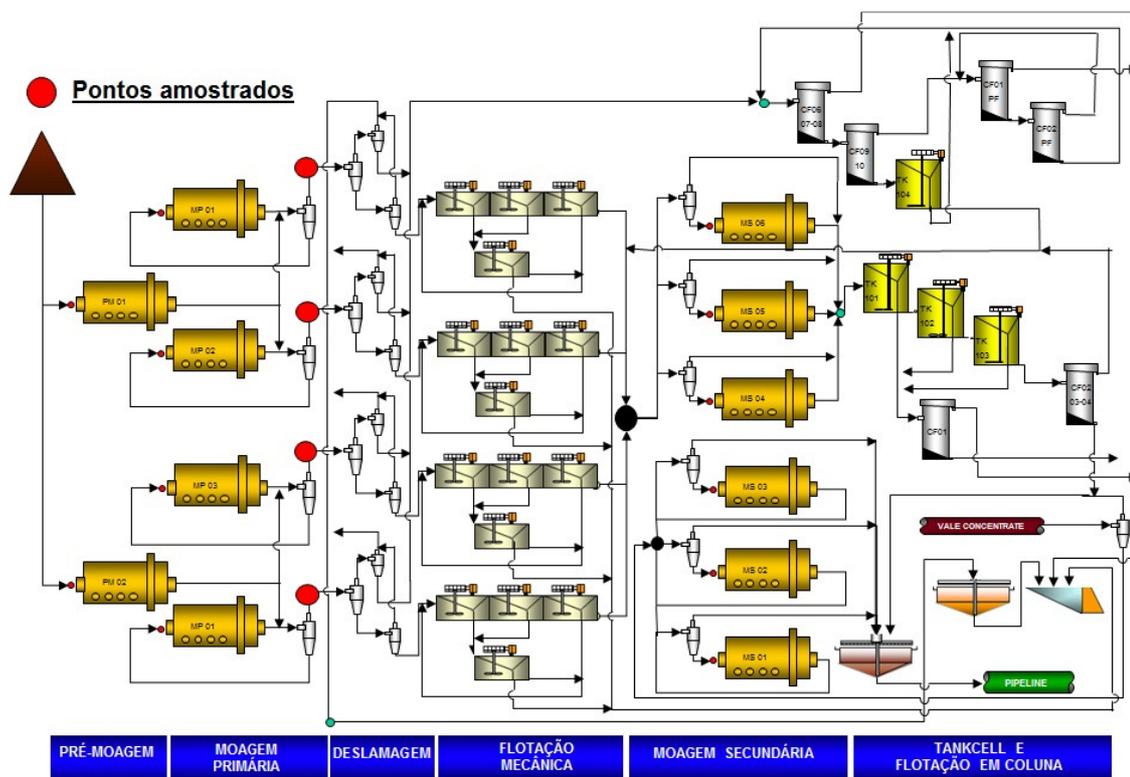


FIGURA 3.2 – Fluxograma do concentrador I da Samarco mostrando em círculos vermelhos os pontos de amostragem que geram o composto final para a análise do grau de liberação.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

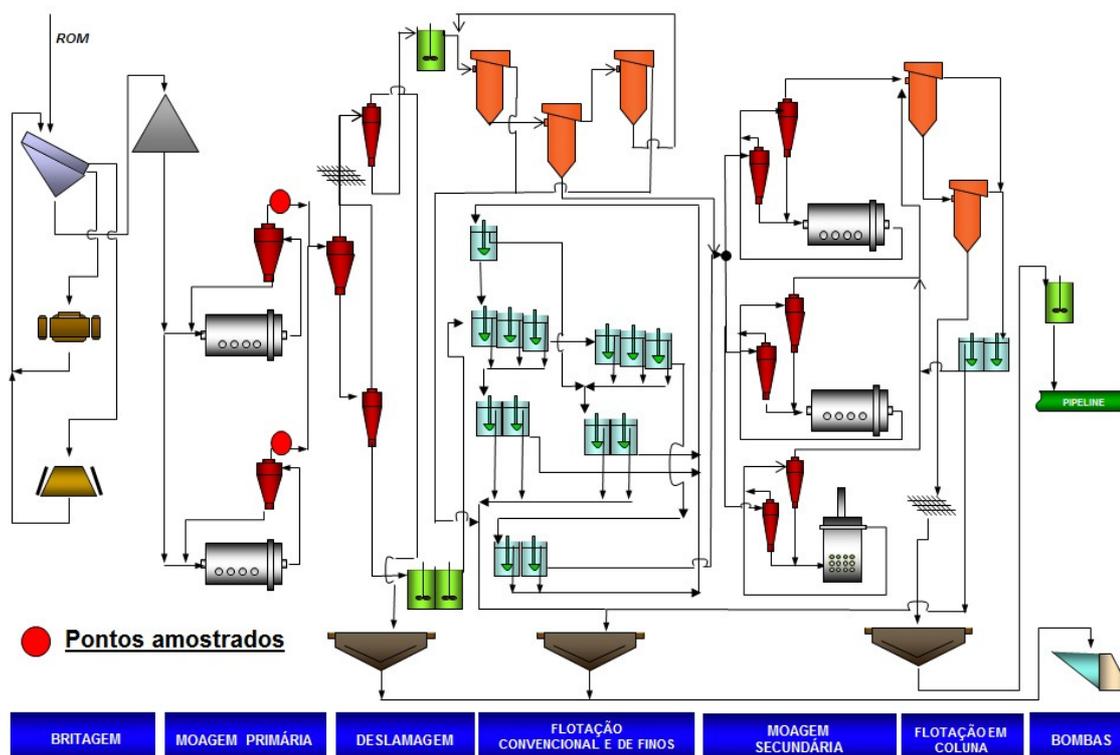


FIGURA 3.3 – Fluxograma do concentrador II da Samarco mostrando em círculos vermelhos os pontos de amostragem que geram o composto final para a análise do grau de liberação.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

3.1.4 Flotação e a importância da liberação

Wills (2006, p. 267)⁵ afirma que “a flotação é sem dúvida a mais importante e versátil técnica de processamento mineral e a sua aplicação e utilização estão constantemente sendo expandidas para tratar maiores tonelagens e cobrir novas áreas”.

O princípio da flotação é separar as partículas do mineral de interesse das partículas de ganga através da diferença das características de superfície entre as várias espécies minerais presentes no minério.

Peres (2007) menciona três condições básicas para a concentração de minerais: a diferenciabilidade, liberabilidade e separabilidade dinâmica.

⁵ Tradução da língua inglesa da obra de Wills (2006, p. 267)

O princípio da diferenciabilidade é fundamentado nas características de superfície das partículas, ou seja, a separação/concentração acontece em função da diferença físico-química da superfície do quartzo e da hematita. Ela pode ser natural ou induzida, e na flotação é comum se usar reagentes para reforçar esse caráter diferenciador. "A liberação dos grãos minerais é obtida através de operações de fragmentação (britagem e moagem) intercaladas com etapas de separação por tamanho e a separabilidade dinâmica está diretamente ligada aos equipamentos empregados" (PERES, 2007. p. 117).

Para que ocorra a concentração dos minerais de ferro é necessário reforçar o caráter diferenciador das partículas de hematita e de quartzo adicionando reagentes para reforçar o caráter hidrofílico da hematita e transformar a superfície do quartzo em hidrofóbico. Oliveira, M. *et al.* (2004) explica que o conceito de hidrofobicidade de uma partícula está associado à "molhabilidade" desta partícula pela água. Existem partículas que apresentam uma grande afinidade pela água, partículas hidrofílicas. No entanto, outras, na presença de uma corrente de ar, tendem a ir para superfície da solução justamente por não apresentarem afinidade com a água, partículas hidrofóbicas. Os conceitos de hidrofobicidade e de hidrofiliabilidade estão associados à polaridade dos compostos químicos.

Pelas definições de Peres (2007) e Oliveira, M. *et al.* (2004), fica clara a importância da liberação em uma usina de concentração mineral onde a flotação é o processo responsável pela separação dos minerais de ganga dos minerais úteis. Para que ocorra essa separação é necessário que as partículas estejam liberadas dando condições aos reagentes entrarem em contato com a superfície de cada mineral sujeitando a elas as características superficiais diferenciadoras. Como a flotação da Samarco é reversa, ou seja, a hematita é o material afundado e o quartzo o flotado, é calculado o grau de liberação do quartzo, e um valor deficiente desse indicador acarreta em uma perda significativa na qualidade do concentrado da flotação, ou seja, o teor de sílica fica fora de especificação diminuindo o desempenho da flotação e consequentemente do concentrador.

3.2 Microscopia Digital

A microscopia é um método analítico empregado largamente em diversas áreas do conhecimento como biologia, medicina, geologia, metalurgia, engenharia e mineração, sendo esta última em especial, na área de caracterização tecnológica e mineralogia de processo.

Na caracterização tecnológica e na mineralogia de processo os métodos mais empregados para a identificação das fases minerais são a microscopia ótica (microscópio estereoscópico, microscópio de luz refletida e de luz transmitida), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Difração de Raios-X (DRX).

No nível da tecnologia atual somado à necessidade de melhorar a assertividade das análises microscópicas, juntamente com a automatização das mesmas, entra-se em um campo chamado microscopia digital.

A microscopia digital é a “integração entre microscópio e computador oferecendo aquisição digital de imagens, automação do microscópio e análise de imagens” (PACIORNIK, 2009, p. 7)⁶.

Na FIG. 3.4 apresenta-se o conjunto de microscopia digital, com um sistema computadorizado de aquisição e análise de imagens, da Samarco Mineração S. A.

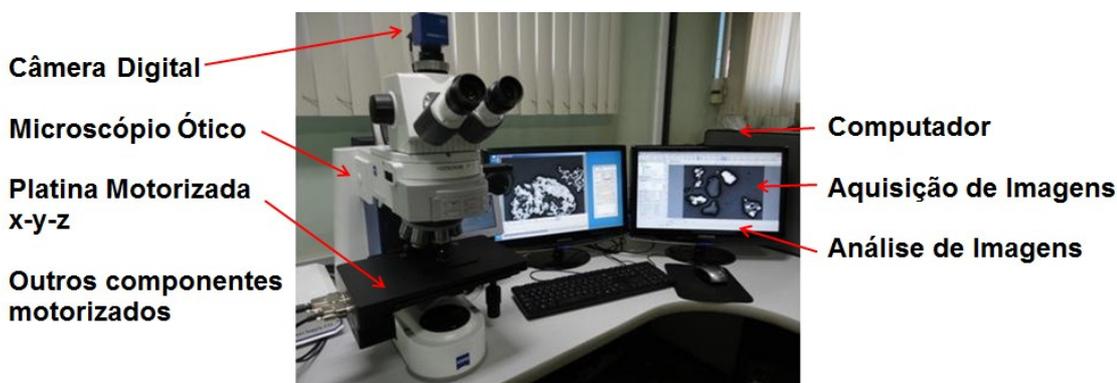


FIGURA 3.4 – Sistema de microscopia digital com aquisição e análise de imagens.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

⁶ www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf

Dentro da microscopia digital podem-se destacar quatro instrumentos mais utilizados: o microscópio ótico, o microscópio eletrônico de varredura, o microscópio eletrônico de transmissão e a microssonda eletrônica.

Existe atualmente no mercado um sistema automatizado de análise de imagens e mineralogia quantitativa, conhecido como *Mineral Liberation Analyzer* (MLA), que conjuga o MEV, um espectrômetro de raios-x dispersivo em energia e um software de análise de imagens digitais. Ele consegue fornecer automaticamente informações sobre a composição mineralógica da amostra e o grau de liberação mineral.

Delbem (2010) desenvolveu um software de análise de imagens obtidas através do MEV para amostras de minério de ferro com objetivos diversos, dentre eles podem-se destacar a identificação e quantificação das fases minerais e o cálculo automático de grau de liberação.

Para caracterizar e identificar as fases mineralógicas presentes em um sinter de minério de ferro através de imagens obtidas por microscópio ótico de luz refletida, Iglesias *et al.* (2009) utilizaram a microscopia digital em conjunto com rotinas de processamento de imagens. Já Lessa *et al.* (2007) conseguiram classificar automaticamente hematita especular e hematita porosa em *pellet feed* utilizando a microscopia ótica digital.

Na próxima seção descrevem-se os principais conceitos e características da microscopia ótica.

3.2.1 Microscópio ótico

O microscópio ótico é um instrumento que utiliza ondas eletromagnéticas na faixa de radiação visível para gerar imagens quando se deseja observar objetos muito pequenos.

A luz é a parte visível do espectro eletromagnético ou faixa de radiação eletromagnética, ela compreende os intervalos de comprimento de onda (λ) de 400nm a 700nm (FIG. 3.5).

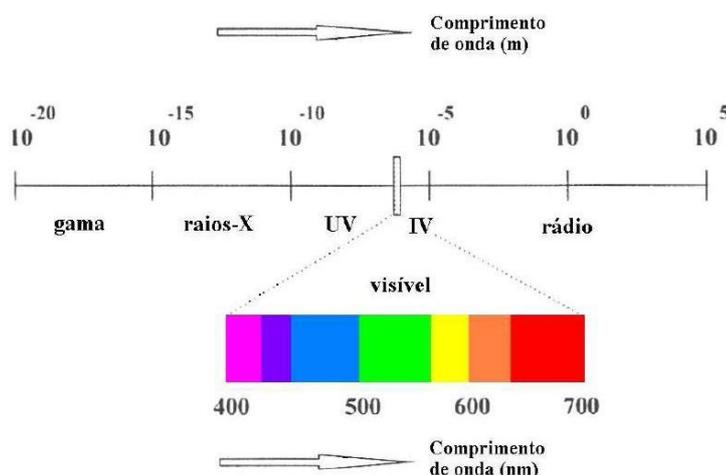


FIGURA 3.5 – Espectro eletromagnético destacando a faixa correspondente ao da luz visível.

Fonte: Brandão, 2010, tema Emissão de elétrons ..., p. 13⁷.

A luz é uma forma de energia radiante, que apresenta natureza tanto ondulatória quanto corpuscular. Esta será tratada como uma onda em movimento harmônico contínuo, representando-se somente a sua componente elétrica, uma vez que é a mais importante na análise dos fenômenos óticos (NARDY; MACHADO, 2002, p. 1)⁸.

Na FIG. 3.6 podem-se observar as componentes das ondas magnéticas e elétricas, bem como a ilustração do comprimento de onda (λ), definido por Nardy; Machado (2002)⁸ como “a distância entre duas posições consecutivas e idênticas (ou em fase) na direção de propagação de uma onda”.

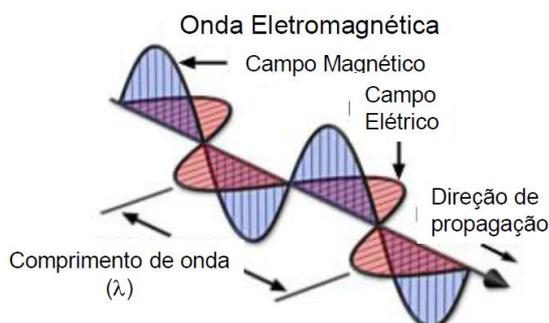


FIGURA 3.6 – Principais características de uma onda eletromagnética.

Fonte: Paciornik, 2009, p. 9⁹.

⁷ Notas de aula; matéria de pós-graduação “Métodos de Instrumentação e Análise”; 1º semestre/2010; tema “Emissão de elétrons e raios-X - Difração de raios-X”.

⁸ www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/opticat1.pdf

⁹ www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf

O microscópio ótico utiliza uma fonte de luz policromática (luz constituída por diferentes comprimentos de onda) e, segundo Nardy; Machado (2002)⁸, é desejável em um microscópio, pois promove o fenômeno da dispersão dos índices de refração nos minerais.

Um aspecto importante na microscopia ótica é a natureza dos objetos observados e o tipo de iluminação do microscópio. Com relação a este último aspecto tem-se o microscópio ótico de luz transmitida e o microscópio ótico de luz refletida, ambos largamente empregados na identificação e quantificação de minerais. O microscópio ótico de luz transmitida é utilizado para analisar minerais transparentes que são colocados entre a objetiva e a fonte de luz, de modo que a imagem é formada pela luz transmitida através da amostra (FIG. 3.7 (a)). O microscópio ótico de luz refletida é usado normalmente para minerais opacos, onde a luz incide na superfície do mineral e é refletida em direção à objetiva (FIG. 3.7 (b)). É importante salientar que existem microscópios com as duas opções de fonte luminosa, luz transmitida e refletida, conjugando todas as funções citadas.

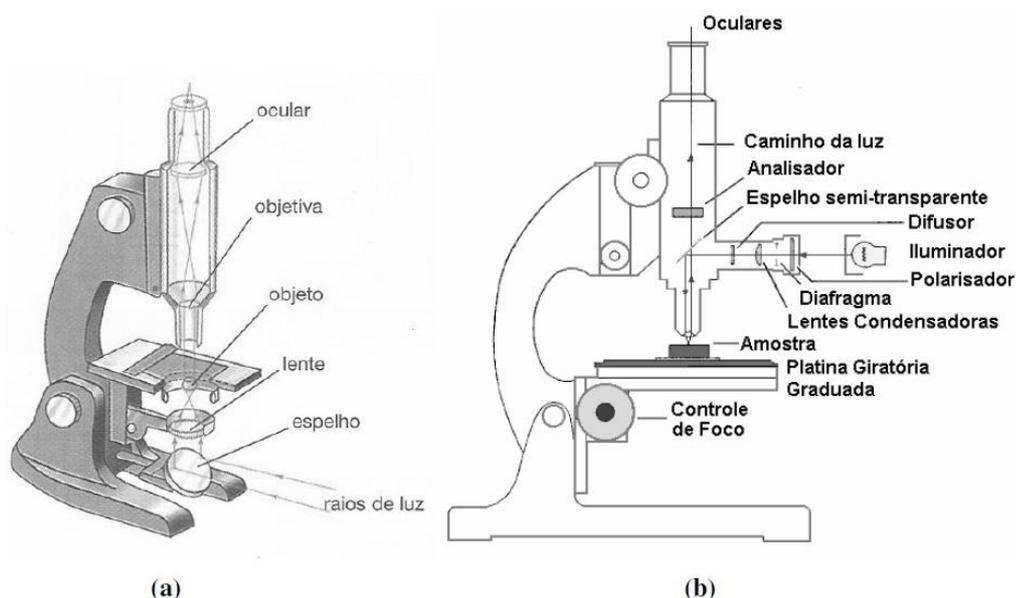


FIGURA 3.7 – (a) Microscópio ótico de luz transmitida e (b) microscópio ótico de luz refletida.

Fonte: (a) Maximo e Alvarenga, 2000, *apud* ROSA, 2008, p. 22; (b) Goldenstein, 2007, *apud* ROSA, 2008, p. 22.

Na FIG. 3.8 apresentam-se duas imagens de condrito (côndrulo com olivina + tetraedrita + kamacita) obtidas por um microscópio de luz refletida e por um microscópio de luz transmitida.

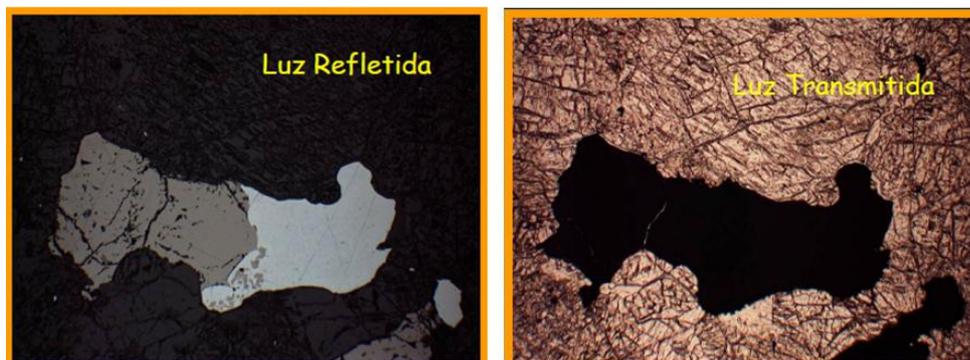


FIGURA 3.8 – Fotomicrografia de duas imagens de côndrulo com olivina + tetraedrita + kamacita adquiridas por microscópio de luz refletida e por um microscópio de luz transmitida.

Fonte: Nardy; Zanardo; Galembeck, 2010, p. 2¹⁰.

A seguir descrevem-se alguns componentes básicos e importantes do microscópio:

- a) Objetiva: é uma lente, ou uma associação de lentes, que fica mais próximo do objeto a ser observado e tem como função ampliar a imagem. Existem dois tipos de objetivas: as “secas”, que são aquelas em que o ar é o meio de imersão e fica entre a objetiva e a amostra; e de “imersão” que Nardy; Machado (2002, p. 16)¹¹ descrevem como sendo aquela em que o meio entre a objetiva e a amostra é um líquido viscoso, com índice de refração conhecido e que tem como função aumentar a abertura numérica da objetiva e conseqüentemente sua nitidez. Objetivas de imersão são usadas em casos muito especiais, onde há necessidade de grande aumento linear da amostra.

- b) Oculares: são as associações de lentes que ficam mais próximos dos olhos do observador e têm a função de ampliar a imagem gerada pela objetiva. A imagem ampliada gerada pelo conjunto objetiva e ocular é responsável pelo aumento visual total do microscópio e pode ser calculada apenas multiplicando o aumento da objetiva pelo aumento da ocular.

¹⁰ www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/T2.pdf

¹¹ www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/opticat2.pdf

- c) Platina: é o suporte que sustenta a amostra preparada e possui movimento de rotação.
- d) Filtros: são placas de vidro coloridos que têm como finalidade absorver certas radiações indesejáveis da fonte de luz. “Como conseqüência, a utilização apropriada de um filtro permite aumentar o contraste de imagens e melhorar a resolução” (NARDY; MACHADO, 2002, p. 20)¹¹.
- e) Condensadores: tem como objetivo direcionar (convergir) os raios de luz sob a amostra em análise.
- f) Diafragma: “é um dispositivo que limita a quantidade de luz que penetra no microscópio e se localiza geralmente sobre o condensador fixo” (NARDY; MACHADO, 2002, p. 20)¹¹. A diminuição do feixe de luz permite realçar as feições morfológicas dos minerais como suas bordas, traços de fratura, cores características, rugosidade das superfícies, presença de inclusões etc (NARDY; MACHADO, 2002)¹¹.

A FIG 3.9 mostra os componentes descritos nas alíneas acima.

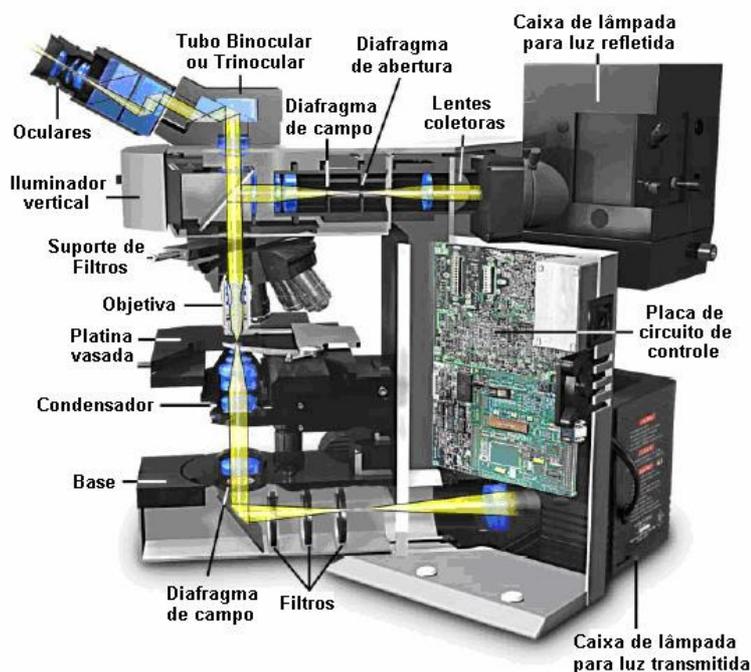


FIGURA 3.9 – Componentes do microscópio óptico.

Fonte: Davidson e Abramowitz, 2002, *apud* Rosa, 2008, p. 23.

A luz polarizada é outro conceito importante na microscopia ótica. A luz inicialmente, gerada por uma fonte luminosa comum, é uma luz não polarizada, onde os campos elétricos e magnéticos oscilam em todas as direções perpendiculares à direção de propagação, como podem ser observados na FIG. 3.6 apresentada anteriormente. A luz polarizada, por sua vez, apresenta apenas uma direção de vibração, ou seja, apenas uma componente elétrica perpendicular a sua direção de propagação (FIG. 3.10).

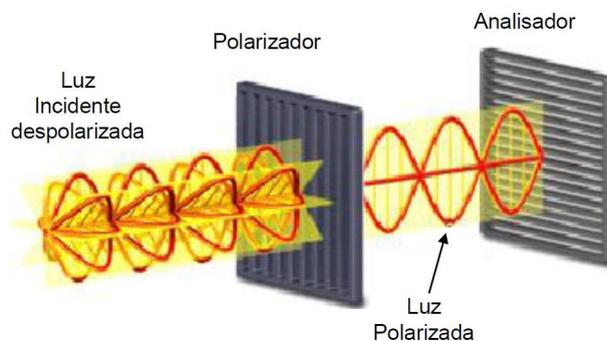


FIGURA 3.10 – Desenho esquemático da polarização da luz.

Fonte: Paciornik, 2009, p. 15¹².

¹² www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf

O polarizador é o dispositivo que realiza o fenômeno de polarização e, normalmente, os microscópios atuais vêm com dois polarizadores: o inferior, chamado somente de polarizador, que fica entre a fonte de luz e a amostra, e o superior, chamado de analisador que é móvel e fica acima da amostra e abaixo da ocular. Quando esses são colocados em série e a componente elétrica vertical da onda passa pelo polarizador e o analisador fica para fora do microscópio, diz-se que há polarização paralela. Quando a componente elétrica é absorvida pelo analisador acontece a extinção da luz polarizada, onde dá-se o nome de polarização cruzada. Existe também o evento intermediário que se denomina polarização semi-cruzada.

Observam-se na literatura como em Brandão (2007), Pereira (2010) e Nardy; Zanardo; Galembeck (2010)¹³ os mesmos três tipos de polarização citados acima, mas conhecidos também como nicóis paralelos/descruzados (quando o analisador está para fora do microscópio), nicóis cruzados (quando o analisador está embutido no microscópio) e nicóis semi-cruzados, definidos assim em função do método de obtenção da luz polarizada.

Um fenômeno óptico importante que ocorre na superfície de certos minerais opacos, minerais transparentes e coloridos, denomina-se pleocroísmo. A luz, ao transmitir-se na superfície de um mineral, é absorvida de maneira seletiva dependendo da direção de vibração no seu interior, ocasionando diferentes cores observadas. Pode-se visualizar este fenômeno apenas girando a platina.

3.2.2 Tipos de preparação de amostras para observação em microscópio óptico

Existem basicamente dois tipos de preparação de amostras para visualização em microscópio óptico, a lâmina delgada polida e a seção polida. Cada uma delas tem uma preparação específica detalhada a seguir.

- a) Lâmina delgada polida: utilizada para a observação de minerais transparentes em microscopia de luz transmitida. A amostra é disposta em uma lâmina de

¹³ www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/elearn.html

vidro com espessura extremamente fina, em torno de 0,1mm (FIG. 3.11). Neumann; Schneider; Neto (2004) afirmam que a petrografia em lâminas delgadas é a melhor maneira de se identificar silicatos, como os dos grupos dos feldspatos, piroxênios, anfibólios e micas, que apresentam grande similaridade composicional ou estrutural, e, portanto dificuldades para sua identificação por DRX, MEV e *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS) conhecido como espectrômetro de raios-x dispersivo em energia, mas que são perfeitamente identificáveis ao microscópio ótico. Há algumas restrições na quantificação das fases, análise modal, por exemplo, pois é uma análise demorada e exige operador especializado. Neumann; Schneider; Neto (2004, p. 65-66, destaque em negrito é nosso) comentam que:

Uma vez que as propriedades ópticas diagnosticadas da maioria dos minerais transparentes dependem da geometria da intersecção do cristal e do ângulo de incidência da luz, **as cores variam com o movimento rotatório da platina**, de maneira que **o reconhecimento automático dos minerais, por análise de imagens, é impraticável até o momento, com raras exceções**.



FIGURA 3.11 – Lâmina delgada polida.

Fonte: Pereira, 2010.

- b) Seção polida: usado para analisar minerais opacos em microscópio de luz refletida, é preparada com resina e requer um polimento muito preciso para evitar ranhuras e direções preferenciais na superfície do mineral (FIG. 3.12). Neumann; Schneider; Neto (2004, p. 66, destaque em negrito nosso) avaliam que apesar de diversos minerais exibirem pleocroísmo, em geral neste preparado o fenômeno é fraco, e não se constitui num aspecto de diagnóstico primordial. “Desta forma, em **luz refletida já é possível a automatização**, e pelo **processamento digital de um número adequado de imagens é possível a quantificação de fases e medidas de liberação**”.

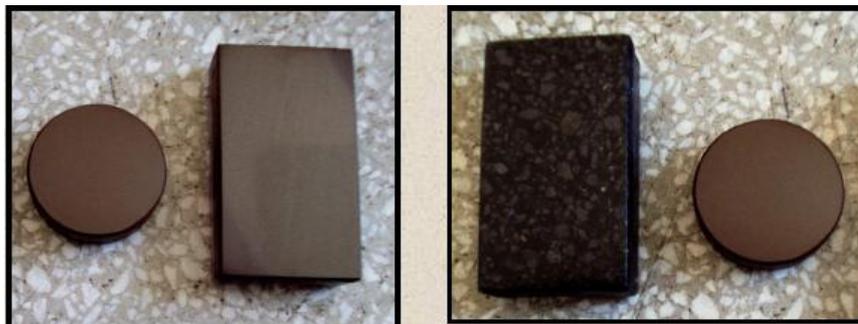


FIGURA 3.12 – Seção polida.

Fonte: Pereira, 2010.

3.3 Processamento e Análise de Imagens Digitais

A evidência de uma das primeiras áreas a utilizar uma imagem digital foi na década de 1920, com a transmissão de imagens por cabos submarinos entre Londres e Nova York, para a publicação na indústria jornalera. Antes desta época o processo de envio de imagens durava mais de uma semana e, logo depois da implantação desse novo sistema de transmissão digitalizando a imagem, o processo durou menos de três horas (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Antes de abordar os conceitos de processamento e análise digital de imagens é importante salientar que esta área se confunde com outra encontrada na literatura e trabalhos científicos como Frick (2008), que é a visão computacional.

Em linhas gerais, a visão computacional é a ciência e tecnologia das máquinas que enxergam. Ela desenvolve teoria e tecnologia para a construção de sistemas artificiais que obtém informação de imagens ou quaisquer dados multi-dimensionais.

Muitas de suas técnicas podem ser usadas na automação industrial para a detecção de eventos, localização, reconhecimento e classificação de objetos, ou ainda, a determinação de posições e orientação de objetos (FRICK, 2008). “O objetivo da visão computacional é automatizar a tomada de decisões úteis sobre objetos físicos e cenas reais com base em imagens detectadas” (SHAPIRO; STOCKMAN, 2001, *apud* FRICK, 2008, p. 28).

Essas duas áreas se confundem nas técnicas básicas de aplicação, pois possuem técnicas semelhantes e compartilhadas como, por exemplo, o reconhecimento de padrões supervisionados, classificação e reconhecimento de padrões não supervisionados.

Para este trabalho foca-se na ciência denominada Processamento e Análise Digital de Imagens (PADI), por se encaixar na metodologia do projeto e pelas demandas de aplicação.

O processamento e análise digital de imagens é um conjunto de técnicas aplicado na modificação de imagens digitais, a níveis de pixels, visando obter informações quantitativas da amostra analisada. O objetivo desta técnica é basicamente melhorar a visualização da imagem e permitir a percepção automática de dados quantitativos das imagens digitais.

A sua aplicação é bastante diversificada abordando as áreas de medicina, geologia, indústria automobilística, siderurgia, mineração, astronomia, geografia, arqueologia entre outras.

Oliveira, E. (2007, p. 1) comenta que:

As técnicas de análise de imagem são empregadas, desde meados da década de oitenta na mineração, em aplicações de monitoramento das dimensões do minério conduzido através das correias transportadoras e identificação de pedras preciosas, extração de informações referentes à granulometria e à inspeção das etapas de britagem, classificação e beneficiamento do material.

Embora o sistema de visão e interpretação humana seja excelente para reconhecer padrões de uma maneira qualitativa, o ser humano não é tão bom em interpretações quantitativas. Por exemplo, na hora de contar partículas em uma imagem ou estimar a forma e o tamanho de objetos quantitativamente, dependendo do número de amostras, se torna uma tarefa tediosa e menos precisa para o ser humano, dependendo fortemente de caráter subjetivo. “Por isso, desde o início da era digital, muitos esforços têm sido feitos para a aplicação dos computadores em tarefas de análise quantitativa de imagens, uma vez que, diferentemente dos humanos, as

máquinas são excelentes para a contagem e medição de objetos” (RODENACKER; BENGTTSSON, 2002, *apud* ROSA, 2008, p. 29-30).

A fim de organizar uma sequência padrão no processamento e análise digital de imagens, Vieira; Paciornik (2001, *apud* GOMES, 2007) definiram passos elementares para o estudo nesta área (FIG. 3.13).

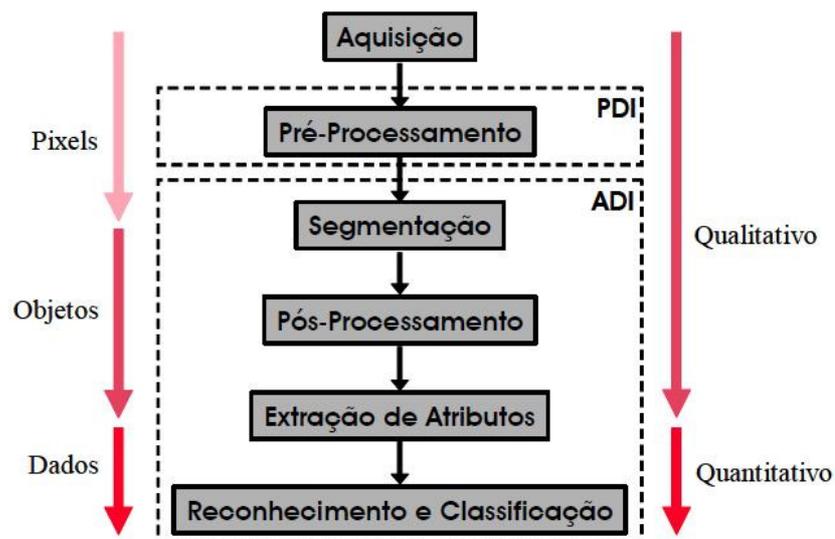


FIGURA 3.13 – Sequência padrão de Processamento e Análise Digital de Imagens.

Fonte: Gomes, 2007, p. 42.

A sequência inicia-se com a aquisição da imagem que contempla a preparação da amostra, a formação da imagem e sua digitalização. Logo, tem-se o bloco de Processamento Digital de Imagens (PDI), que tem como função preparar a imagem para as análises subsequentes e fornecer informações qualitativas. O último bloco, Análise Digital de Imagens (ADI), tem como objetivo fornecer informações quantitativas de acordo com o requerimento de cada processo.

Nas próximas seções detalham-se os passos fundamentais da sequência padrão de processamento e análise digital de imagens, bem como os conceitos básicos e suas principais operações.

3.3.1 Aquisição e imagem digital

Nesta seção serão descritos os conceitos de imagem digital e alguns conceitos básicos necessários ao entendimento de operações de pré-processamento, segmentação e pós-processamento.

A aquisição da imagem é de fundamental importância para o processamento e análise de imagens digitais, pois ela pode dificultar a aplicação de ferramentas, ou até mesmo inviabilizá-la. Deve-se tomar cuidado na aquisição da imagem para evitar imperfeições, ruídos nas imagens, não uniformidade na iluminação e inclinação da amostra, pois pode dificultar as próximas etapas de análises.

Para que o software realize as operações de processamento, a imagem precisa estar digitalizada. Portanto, pode-se afirmar que uma imagem digital é um arquivo de computador onde a imagem original foi discretizada em uma matriz ou função $f(x,y)$, onde x e y representam as coordenadas espaciais, e f representa a intensidade do pixel de posição correspondente na imagem real, ou seja, uma projeção de uma cena em um plano (FIG. 3.14). “Em termos práticos, para ser manipulada por um computador a imagem precisa estar em uma forma numérica” (OLIVEIRA, E., 2007, p. 4).

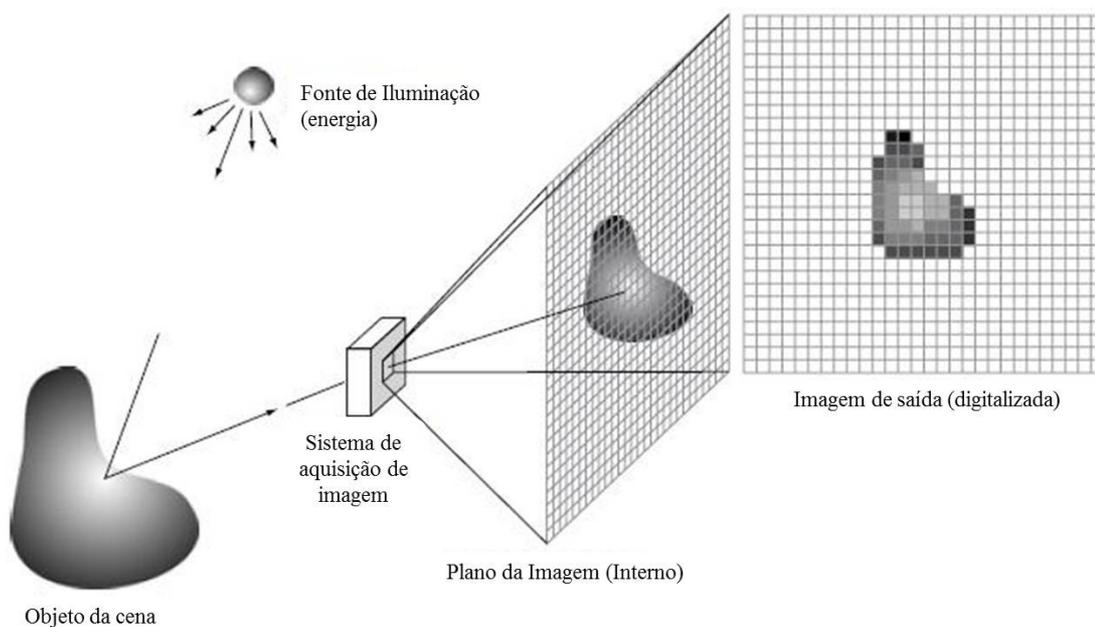


FIGURA 3.14 – Exemplo do processo de aquisição de imagem digital mostrando a projeção de uma cena em um plano.

Fonte: Adaptado de Gonzalez; Woods, 2002, p. 50.

O **pixel** é o elemento unitário em uma imagem digital, ou seja, é o menor valor ou unidade de uma imagem digitalizada (FIG. 3.15).

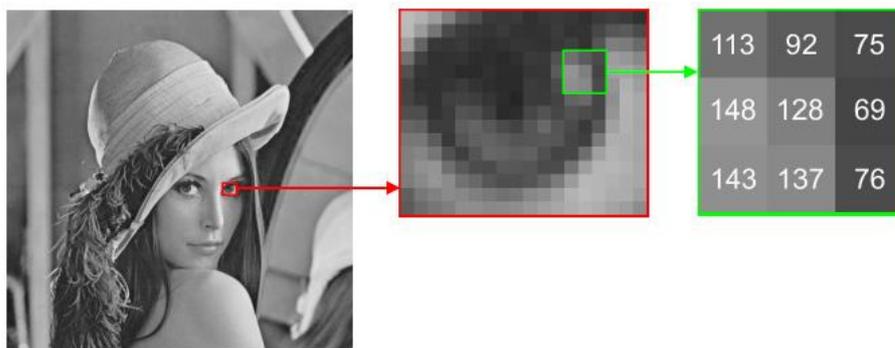


FIGURA 3.15 – Imagem digital mostrando os pixels.

Fonte: Gomes, 2007, p. 19.

Outros dois conceitos importantes são a **resolução** de uma imagem digital e a **quantização**. A resolução é dada como o número de pixels por unidade de área, e é uma grandeza que mede a qualidade da imagem, ou seja, quanto maior a resolução melhor serão percebidos os detalhes da imagem. A quantização é o número máximo de níveis de intensidade ou cor que a imagem digital pode apresentar.

Na FIG. 3.16 podem-se observar quatro figuras representando os conceitos de resolução e quantização. Na direção horizontal a resolução varia da esquerda para a direita de (128x128 pixels) para (512x512 pixels). Já na direção vertical a quantização varia de quatro níveis de cinza para 256 níveis de cinza no sentido de cima para baixo.



FIGURA 3.16 – Quatro figuras representando a variação da resolução e quantização de uma imagem digital.

Fonte: Paciornik, 2011, p. 34¹⁴.

Ainda no conceito de quantização, uma imagem digital pode ser **monocromática** ou **colorida**. A imagem monocromática, apesar de mais simples, é muito usada no processamento digital de imagens. Ela consiste na quantização ou variação de intensidade de apenas um canal de cor, por exemplo, os mais utilizados, são as imagens em escala de cinza e as imagens binárias (FIG. 3.17).

¹⁴ www.dema.puc-rio.br/cursos/ipdi/html/ipdi.pdf



FIGURA 3.17 – Imagem da esquerda em escala de cinza e imagem da direita binarizada.

Fonte: Adaptado de Barboza, 2004.

Uma imagem no sistema tons de cinza de 8 bits é uma imagem monocromática onde a intensidade de cor varia de 0 (cor preta) a 255 (cor branca). No sistema binário a variação de intensidade permite somente 2 valores, 0 (cor preta) e 1 (cor branca).

O sistema de cor mais utilizado atualmente é o *Red-Green-Blue* (RGB). Existem também os sistemas *Cyan-Magenta-Yellow* (CMY), o *Hue-Saturation-Lightness* (HSL), o *Hue-Saturation-Brightness* (HSB) entre outros. Uma imagem gerada pelo sistema de cor RGB é uma imagem multicomponente das cores primárias vermelho, verde e azul.

Este modelo se baseia em um sistema de coordenadas cartesianas tridimensional onde associa-se a cada eixo uma das três cores primárias. Cada cor corresponde a um ponto nesse espaço, sendo portanto representada por três coordenadas: x , y e z que podem assumir cada uma valores inteiros entre 0 e 255. As cores primárias, vermelho, verde e azul são representadas pelos pontos $(255,0,0)$, $(0,255,0)$ e $(0,0,255)$ respectivamente, e as cores secundárias que se originam de combinações de duas cores primárias, são representadas pelos pontos $(255,255,0)$ (amarelo), $(255,0,255)$ (magenta) e $(0,255,255)$ (ciano) (OLIVEIRA, E., 2007, p. 5).

Um exemplo de imagem digital colorida no sistema RGB é apresentado na FIG. 3.18.

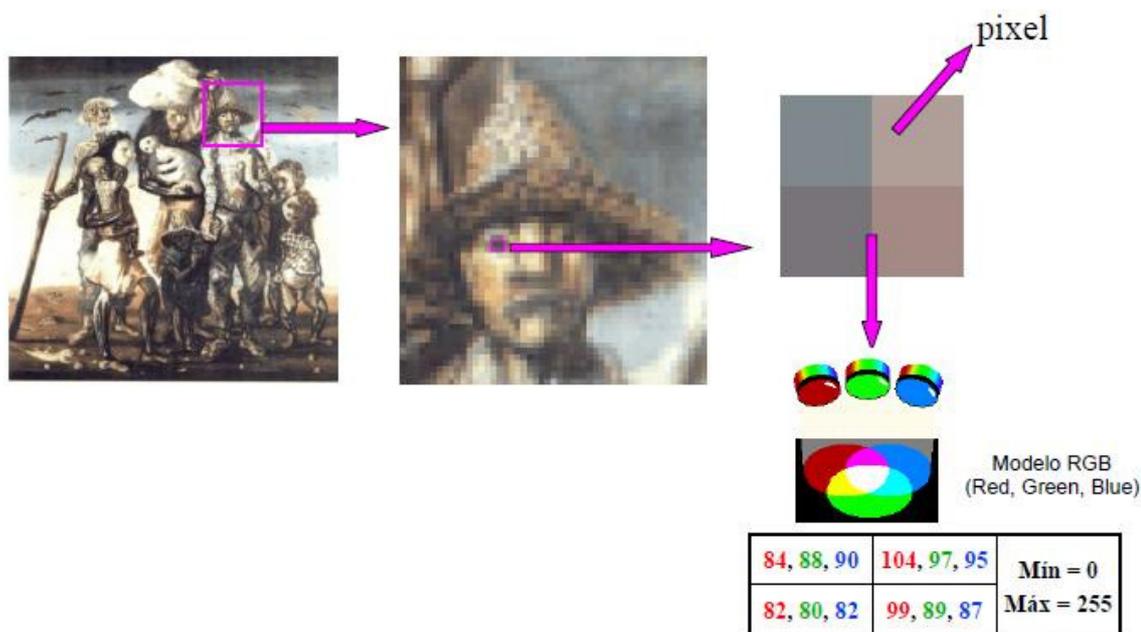


FIGURA 3.18 – Figura representando o sistema de cor RGB.

Fonte: Paciornik, 2011, p. 7¹⁴.

3.3.2 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento tem como objetivo melhorar e corrigir erros da etapa de aquisição e prepará-la para a análise da imagem, facilitando, assim, a aplicação de suas técnicas.

Oliveira, E. (2007, p. 9) explica de forma sucinta a etapa de pré-processamento:

Nesta etapa devem ser corrigidas quaisquer distorções ocasionadas durante a fase de captura da imagem como, por exemplo, distorções geométricas causadas pelas lentes ou pela câmera, variações na iluminação entre outras interferências, ou seja, é nesta etapa que a imagem é adequada ao algoritmo responsável por realizar a extração das informações necessárias para a análise em questão. O realce dos detalhes da imagem também deve ser abordado nesta fase, com o uso de técnicas para a eliminação de partes indesejadas, ajustes de brilho, retirada de partes insignificantes, dentre outras, de modo a obter minuciosamente as características do que se deseja medir ou verificar.

Três conceitos básicos são necessários para o melhor entendimento da etapa de pré-processamento, o histograma, o brilho e o contraste de uma imagem digital.

O **histograma** é uma representação gráfica da imagem digital onde o eixo horizontal representa a faixa/escala dos níveis de intensidade dos pixels da imagem e o eixo vertical representa a quantidade/número de pixels de cada nível de intensidade na imagem. A FIG. 3.19 mostra uma imagem de partículas de quartzo em uma seção polida e seu respectivo histograma.

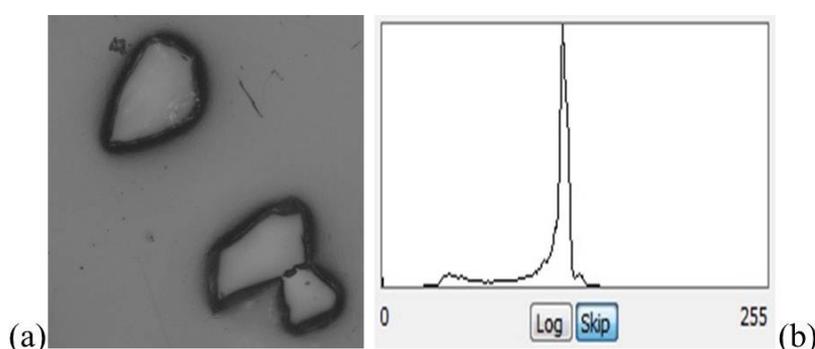


FIGURA 3.19 – Figura de partículas de quartzo em uma seção polida. (a) imagem digital em escala de cinza; (b) histograma referente a imagem onde a abscissa representa a intensidade dos pixels e a ordenada o número de pixels.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

O histograma da imagem digital é uma ferramenta bastante útil na etapa de pré-processamento, fornece uma visão estatística sobre a distribuição das intensidades dos pixels, sobre o contraste (desvio padrão das intensidades dos pixels) da imagem e os níveis de brilho [contraste e brilho são conceituados a seguir]. Além disso, o histograma é bastante utilizado na etapa de segmentação, principalmente em técnicas que se utilizam da similaridade entre os pixels (IGLESIAS, 2008, p. 23).

Gonzalez; Woods (2002, *apud* IGLESIAS, 2008, p. 25) comentam que “embora o histograma forneça uma descrição global da imagem que nada diz sobre seu conteúdo, sua forma pode se constituir em informação crucial para a análise desta imagem”.

Com ele, por exemplo, se pode diferenciar as distintas fases num minério de ferro, onde os picos de intensidade correspondem a cada uma das fases do mesmo. Isto permite separar e quantificar uma ou mais fases do resto da imagem, fornecendo uma valiosa informação quantitativa da composição do material (IGLESIAS, 2008, p. 25).

O **brilho** de uma imagem digital é definido como a localização da intensidade dos pixels referente à faixa tonal da imagem, por exemplo, em uma imagem em escala de cinza (0 a 255 níveis), se a maioria dos níveis dos pixels estiver próximo a 0 (preto), diz-se que é uma imagem escura, ou seja, possui baixo brilho. Já uma imagem que apresenta a maioria dos níveis dos pixels próximo a 255 (branco), pode-se falar que é uma imagem clara, ou seja, possui alto brilho (FIG. 3.20 (a) e (b)).

O **contraste** de uma imagem refere-se a variabilidade dos níveis de intensidade dentro da faixa tonal da imagem, ou seja, quanto maior a quantidade de níveis de intensidade “espalhados” na faixa tonal, maior será seu contraste, e quanto menor a variação dos níveis de intensidade na faixa tonal, menor será o contraste (FIG. 3.20 (c) e (d)).

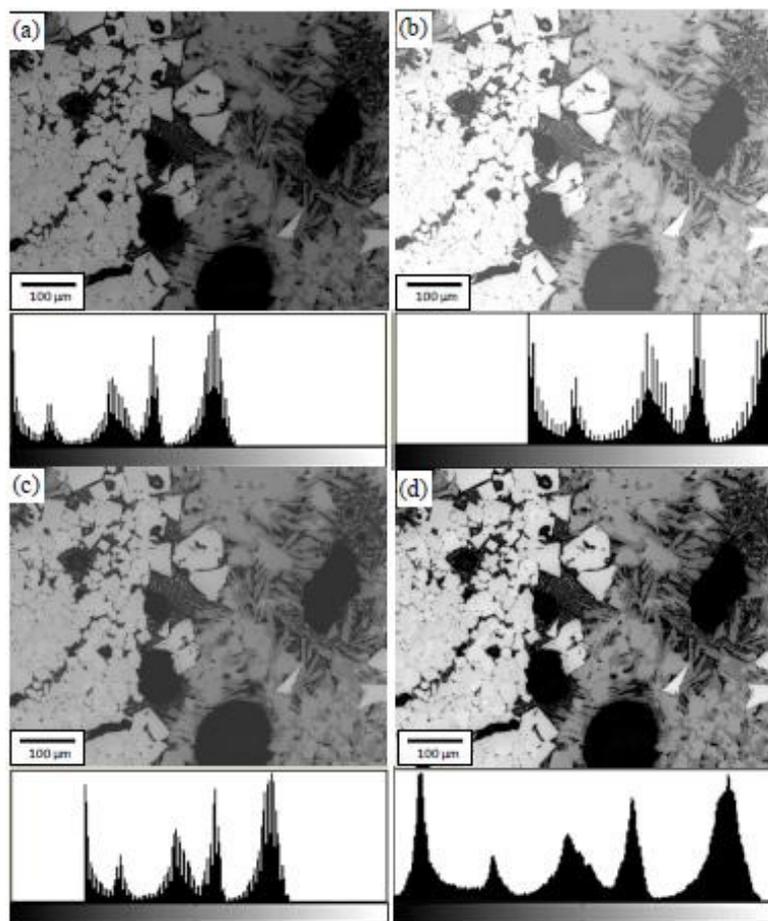


FIGURA 3.20 – Exemplos de imagens e seus respectivos histogramas. (a) imagem escura, baixo brilho; (b) imagem clara, alto brilho; (c) imagem com baixo contraste; (d) imagem com alto contraste.

Fonte: Iglesias, 2008, p. 24.

O contraste e o brilho de uma imagem digital são muito importantes no processamento e análise digital de imagens, as manipulações podem facilitar a aplicação das técnicas de pós-processamento e, principalmente, de segmentação. Em linhas gerais, o brilho e o contraste de uma imagem digital podem ser matematicamente descritos respectivamente como a média e o desvio padrão (variabilidade) dos níveis de intensidade de todos os pixels da imagem (GOMES, 2007).

Neumann; Schneider; Neto (2004, p. 91) afirmam que “somente imagens de alto contraste e elevada resolução permitem picos com boa geometria [...], pré-requisito para qualquer análise de imagem visando liberação [mineral]”.

A seguir se descrevem algumas das técnicas e operações mais utilizadas no pré-processamento de imagens digitais, principalmente ao se tratar imagens de microscopia digital de minério de ferro:

- ▶ Look Up Table (LUT): essa técnica permite realçar alguma faixa tonal de acordo com a demanda no tratamento da imagem, por exemplo, se deseja ver alguns detalhes na região mais escura da imagem, utiliza-se a LUT para aumentar o contraste dessa região, facilitando assim a sua visualização e identificação. A FIG. 3.21 mostra um exemplo de aplicação da LUT.

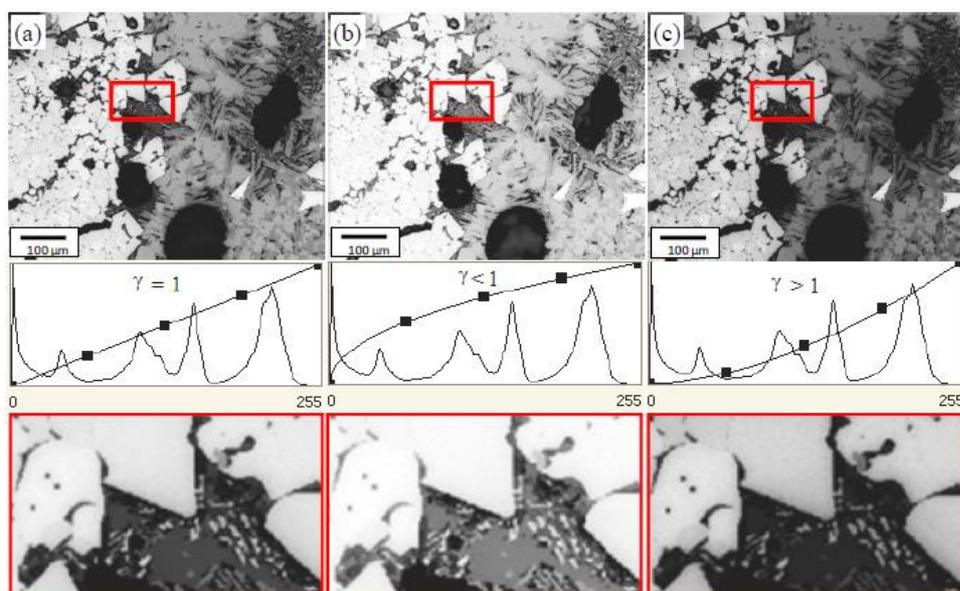


FIGURA 3.21 – Algumas aplicações da LUT. (a) a imagem de saída não sofre alteração; (b) o contraste nas regiões escuras é realçado; (c) o contraste nas regiões claras é realçado.

Fonte: Iglesias, 2008, p. 27.

- ▶ Expansão de contraste: essa ferramenta, usualmente disponível nos softwares de processamento de imagem digital, tem como objetivo expandir o contraste da imagem de modo a facilitar a sua visualização e identificação. Pode-se observar claramente na FIG. 3.22 o efeito dessa técnica, tanto na imagem como no histograma.

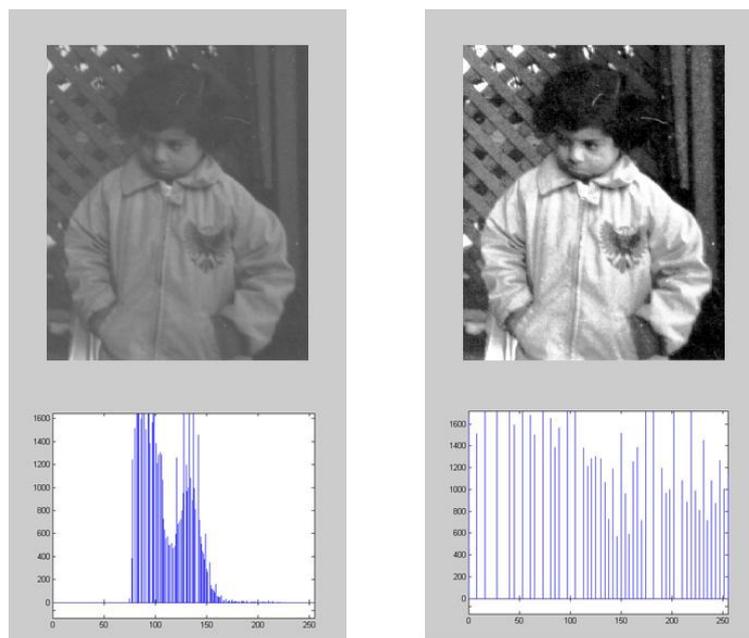


FIGURA 3.22 – Exemplo de expansão de contraste numa imagem e no histograma.

Fonte: Abrantes, 2003, p. 66¹⁵.

- ▶ Correção de fundo: particularmente na microscopia ótica, esta operação é muito utilizada para a correção de defeitos na captura da imagem. Defeitos como instabilidade, iluminação irregular, inclinação da amostra, defeitos nos circuitos *Charge Coupled Device* (CCD) da câmara, sujeiras na hora da captura da imagem e até mesmo fungos nas lentes do microscópio, são problemas comuns nesta área, e uma das principais operações para corrigi-las é a correção de fundo.

A correção de fundo é uma técnica que envolve operações aritméticas de imagens. Consiste em armazenar uma imagem de referência branca, adquirida experimentalmente numa superfície plana, polida e homogênea, obtida de uma amostra padrão com refletância constante, ou obtida por software através de aplicações do filtro passa-baixa. Logo, captura-se a imagem da amostra que se deseja analisar e subtrai-se essa imagem da imagem de referência, gerando uma nova imagem corrigida. Gomes (2007) afirma que a correção de fundo é um procedimento que deve ser realizado sempre, em toda e qualquer aquisição de imagem em microscopia ótica.

¹⁵ www.deetc.isel.ipl.pt/comunicacoesep/disciplinas/pdi/cap5.ppt#380,4, Equalização de histograma

A FIG. 3.23 mostra um exemplo da aplicação de correção de fundo.

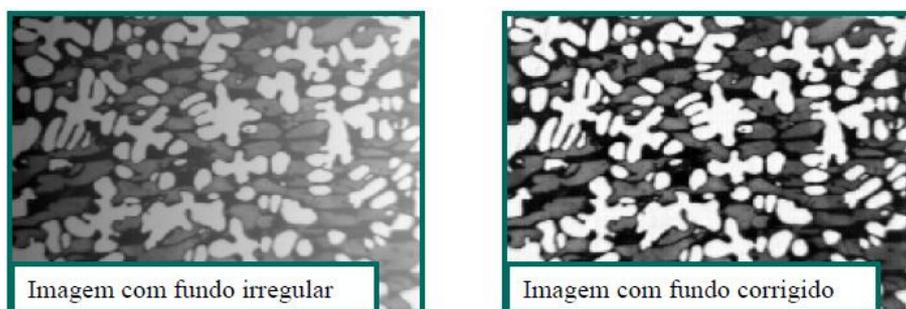


FIGURA 3.23 - Exemplo da aplicação de correção de fundo.

Fonte: Paciornik, 2011, p. 55 ¹⁶.

- ▶ **Filtro de delineação:** este filtro tem por objetivo realçar as bordas de uma imagem. Sutherland; Gottlieb (1991, *apud* GOMES, 2007) comentam que “em imagens de microscopia óptica [...] os pixels existentes nas fronteiras entre fases podem apresentar valores intermediários entre os valores esperados para cada uma das fases”. Isso pode dificultar a visualização das fases de uma amostra de minério de ferro e limitar a aplicação de técnicas nas etapas posteriores como a segmentação, limiarização e classificação supervisionada.

A FIG. 3.24 mostra o efeito da aplicação de um filtro de delineação em uma imagem digital. Nota-se na figura que as bordas ficaram mais nítidas percebendo-se melhor a transição entre fases. Nos histogramas pode-se notar a aplicação desta técnica na visualização dos vales. Eles se tornaram mais profundos, facilitando assim, a aplicação de técnicas posteriores.

¹⁶ www.dema.puc-rio.br/cursos/ipdi/html/ipdi.pdf

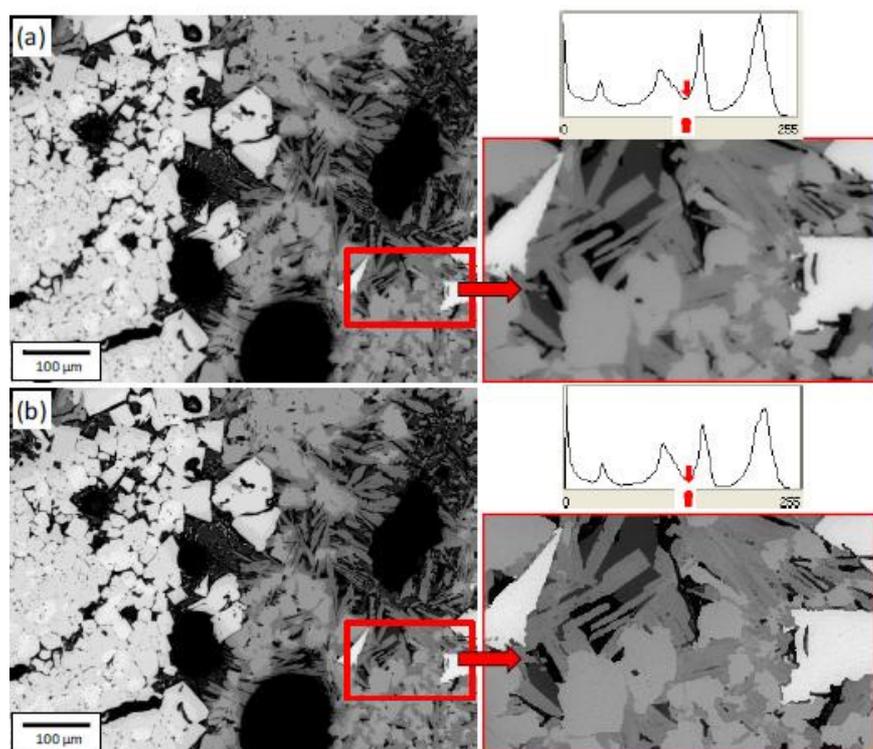


FIGURA 3.24 – Exemplo da aplicação do filtro de delineação. (a) imagem original; (b) imagem delineada.

Fonte: Iglesias, 2008, p. 28.

- ▶ Filtros utilizando a matriz Kernel: os dois tipos de filtros tipo Kernel abordados nesta seção são o filtro passa-baixa e o filtro passa-alta. Esses filtros geralmente realizam cálculos através de uma média ponderada dos pixels das vizinhanças.

Cada vizinho tem um peso associado, definido pelos elementos de uma matriz denominada kernel, que, através de seu tamanho, também define a vizinhança. O kernel varre a imagem de entrada, atribuindo, na imagem de saída, o valor da média ponderada a cada pixel de posição correspondente à do pixel central do kernel sobre a imagem de entrada (GOMES, 2001, p. 32).

As operações aplicando filtros são muito utilizadas no processamento e análise digital de imagens, “pois, a partir da escolha do kernel adequado, diversos procedimentos podem ser implementados, tais como redução de ruído, aguçamento de detalhes e detecção de bordas” (GOMES, 2001, p. 33).

Os filtros passa-alta atuam de forma a atenuar os componentes de baixa frequência da imagem, que correspondem a regiões de pouca alteração no valor de intensidade dos pixels. O resultado é um reforço nas regiões onde há uma variação alta na luminância, o que qualifica esse tipo de filtro para aplicações de detecção de bordas (GONZALEZ; WOODS, 2000, *apud* BARBOZA, 2004, p. 72).

“Já os filtros passa-baixa atuam de forma inversa, atenuando as regiões de alta frequência. [Como resultado se tem] certa diminuição do nível de detalhamento da imagem. Este tipo de filtro é utilizado em aplicações de suavização de imagens e remoção de ruídos” (WINKLER; THOMÉ I, 2003, *apud* BARBOZA, 2004, p. 72).

A FIG. 3.25 mostra o resultado da aplicação dos filtros passa-baixa e passa-alta.

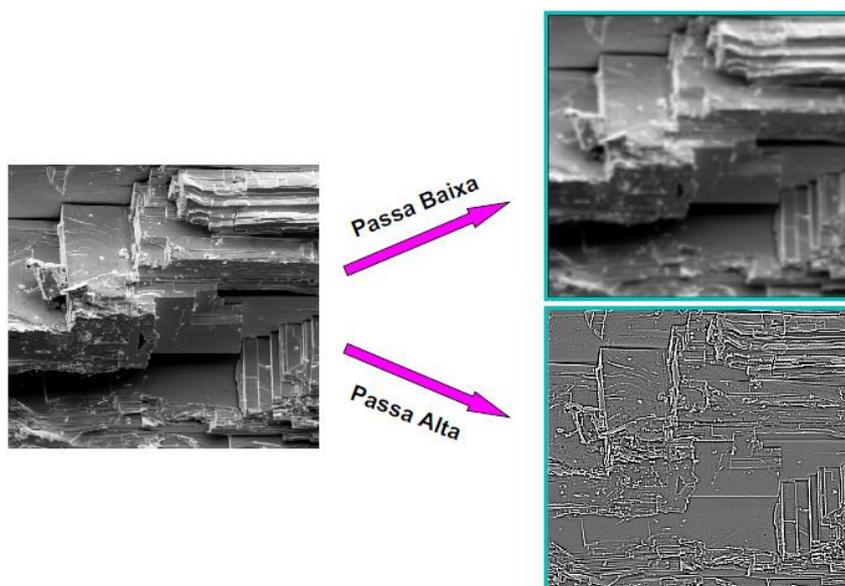


FIGURA 3.25 – Aplicação do filtro passa-baixa e passa-alta.

Fonte: Paciornik, 2011, p. 61 ¹⁷.

3.3.3 Segmentação

O objetivo da etapa de segmentação é isolar zonas de interesse para posterior processamento. Essa técnica parte do princípio de que, por exemplo, as fases de um minério de ferro em uma imagem são separadas por faixas tonais diferentes, ou seja, é possível separar as fases de interesse do fundo da imagem ou de outras fases que não são de interesse do analisador. O resultado da segmentação é uma imagem

binária onde os pixels brancos formam a região de interesse e os pixels pretos o fundo/região que não são de interesse, ou vice-versa.

A FIG. 3.26 mostra um exemplo simples de segmentação.

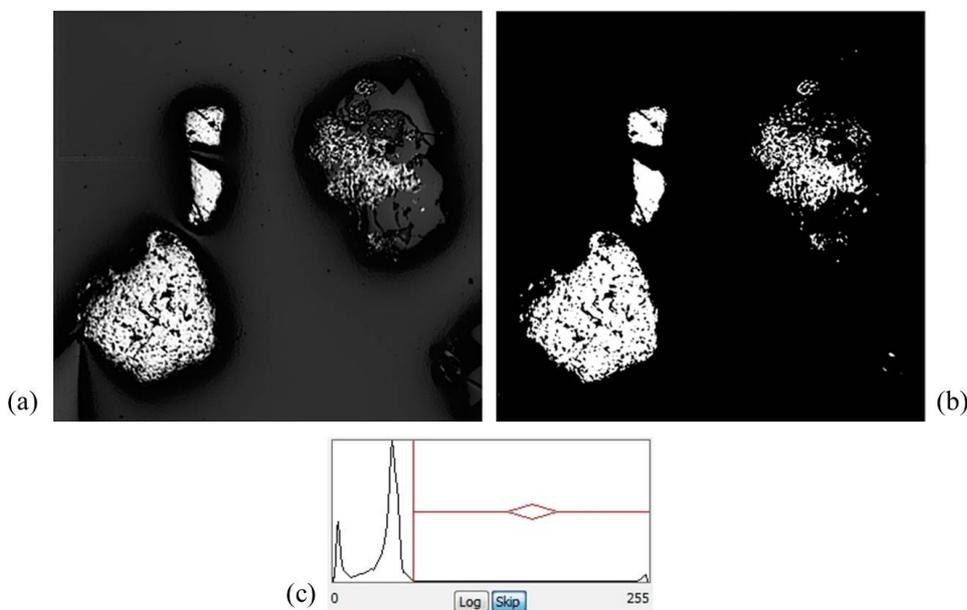


FIGURA 3.26 – Exemplo de segmentação. (a) imagem original; (b) imagem binária; (c) limiar de corte no histograma.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A segmentação é uma etapa de fundamental importância no processamento e análise digital de imagens, podendo ser uma ferramenta de difícil ou fácil aplicação, dependendo da imagem analisada, e a sua correta execução servirá de base para a etapa de aquisição da informação, medição e geração de atributos.

Rosa (2008) comenta sobre os métodos de segmentação com imagens de minerais obtidas por microscopia ótica:

Estes métodos podem ser automatizados com eficiência quando as condições de aquisição das imagens podem ser fixadas e os objetos imageados apresentarem as mesmas características em todas as imagens. Porém isto é muito difícil de se conseguir na identificação de minerais, onde propriedades óticas como birrefletância e pleocroísmo não permitem estabelecer uma correspondência biunívoca entre cor ou brilho e a mineralogia ou a orientação dos

grãos. A identificação automática de objetos com aparência variável demanda métodos adaptáveis às variações esperadas, cuja escolha exige algum conhecimento a respeito dos objetos imageados e das condições de imageamento (ROSA, 2008, p. 31).

Existem várias técnicas para a escolha do limiar de intensidade no histograma, técnicas manuais e automáticas, englobando métodos de segmentação por limiarização, detecção de bordas, contornos, textura, morfologia matemática, limiarização adaptativa, transformada de Hough etc. A escolha do método ideal depende muito do tipo de material analisado, do tipo de instrumento analítico utilizado, bem como os objetivos específicos de cada estudo.

Devido à natureza do presente trabalho, e a particularidade de aplicação dessa técnica, bem como a sua diversidade, optou-se por descrever somente a segmentação por limiarização.

- ▶ Limiarização: o método de limiarização (*thresholding*) é o mais simples e o mais utilizado na segmentação de uma imagem digital. Ele é baseado em faixas tonais onde cada fase de uma imagem representa uma faixa de intensidade. Graficamente, os picos representam as fases e os limiares de corte são colocados entre esses picos, portanto, para o melhor resultado na limiarização, os vales devem ser mais baixos e os picos mais altos e bem definidos.

A limiarização bimodal é determinada por um único tom de corte que separa duas faixas tonais, gerando assim uma imagem binária (FIG. 3.26). Já a limiarização multimodal é determinada por mais de dois tons de corte, pois muitas vezes, ao analisar uma imagem, o objetivo é identificar mais de uma fase presente (FIG. 3.27).

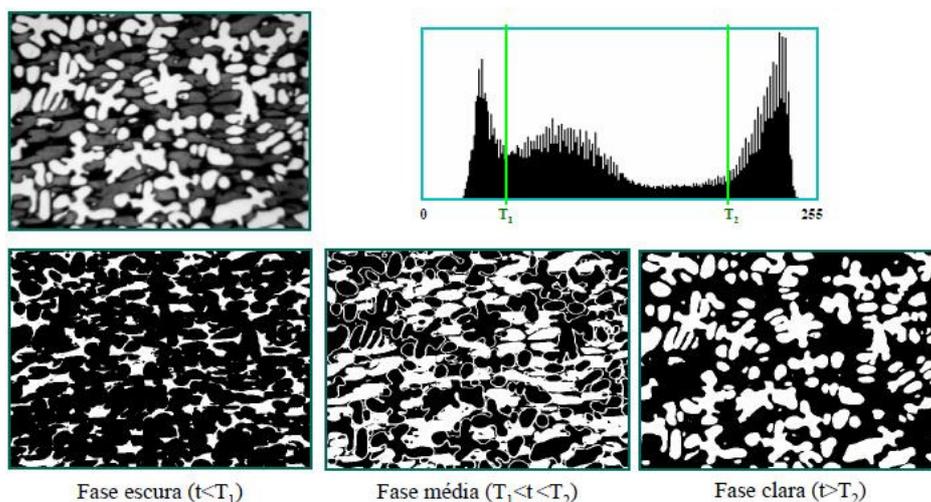


FIGURA 3.27 – Exemplo de uma limiarização multimodal.

Fonte: Paciornik, 2011, p.87 ¹⁷.

3.3.4 Pós-processamento

Seguindo os passos elementares do processamento de imagens, mesmo nas melhores condições e escolhendo o melhor método de segmentação, este pode deixar defeitos residuais na imagem que impossibilitem a extração de informações ou uma classificação.

É necessário, portanto, o pós-processamento para corrigir, suavizar e preparar a imagem para as próximas etapas. As técnicas normalmente utilizadas são as operações lógicas e as operações de morfologia matemática.

As operações lógicas são utilizadas em imagens binárias de entrada operando pixel a pixel, resultando em uma imagem de saída onde cada pixel é preservado ou invertido. As três operações lógicas básicas são o complemento (NOT), a interseção (AND) e a união (OR), a partir das quais qualquer outra operação lógica pode ser definida.

As operações morfológicas são baseadas em duas técnicas, a dilatação e a erosão. Gomes (2001, p. 49-50) explica de maneira simples a dilatação e a erosão:

Na dilatação, para cada pixel preto na imagem de entrada, se houver pelo menos um vizinho branco, o pixel é invertido na imagem de

¹⁷ www.dema.puc-rio.br/cursos/ipdi/html/ipdi.pdf

saída. Assim, os objetos crescem em área, podendo até se unir, e o fundo e os buracos nos objetos diminuem, sendo até mesmo eliminados. Na erosão, para cada pixel branco na imagem de entrada, se houver pelo menos um vizinho branco, o pixel é invertido na imagem de saída. De modo que os objetos diminuem ou são eliminados e o fundo e os buracos crescem.

A FIG. 3.28 mostra um exemplo de aplicação das técnicas de erosão e dilatação.

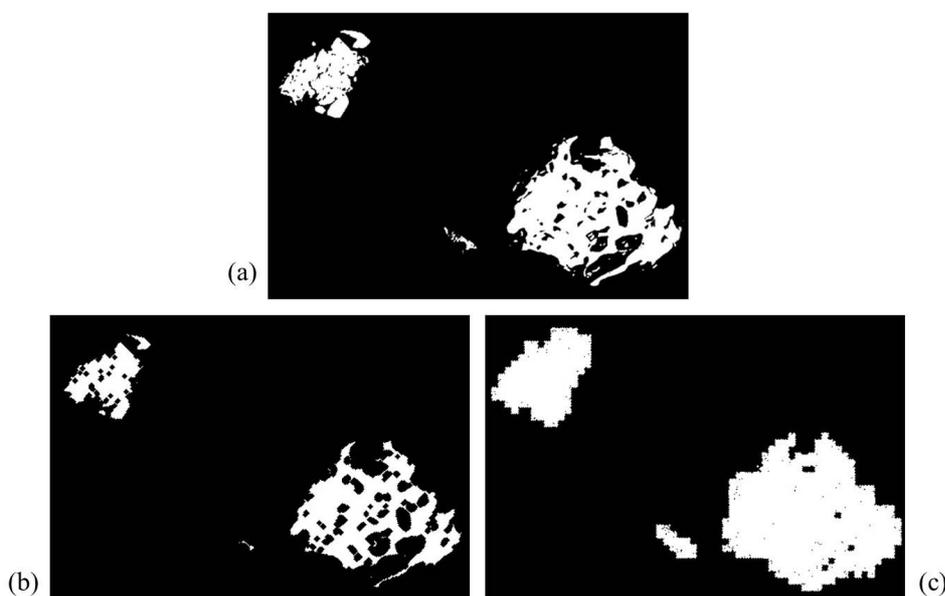


FIGURA 3.28 – Exemplo das aplicações das técnicas de erosão e dilatação. (a) Imagem original binária; (b) imagem erodida; (c) imagem dilatada.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Outras operações importantes são a abertura e o fechamento. Gonzalez; Woods (2000) explicam que a abertura geralmente suaviza o contorno de uma imagem, quebra istmos estreitos e elimina saliências finas. O fechamento também tende a suavizar os contornos mas, em oposição a abertura, geralmente funde as quebras em golfos finos, elimina pequenos buracos e preenche fendas em um contorno.

Existe outra técnica muito utilizada no pós-processamento que é a eliminação de objetos por área (*Scrap*). Essa técnica consiste em eliminar objetos que tenham área, ou seja, número de pixels, inferior a um valor pré-determinado pelo analisador. Dessa maneira, é possível eliminar pequenos objetos na imagem que facilitem possíveis medições e classificações futuras.

Outra operação importante e de simples manuseio é o preenchimento (*Fill*), que consiste em preencher a área interna de objetos, desde que os contornos estejam fechados, de maneira a torná-la homogênea e facilitar estudos posteriores. A FIG. 3.29 ilustra a operação de preenchimento.

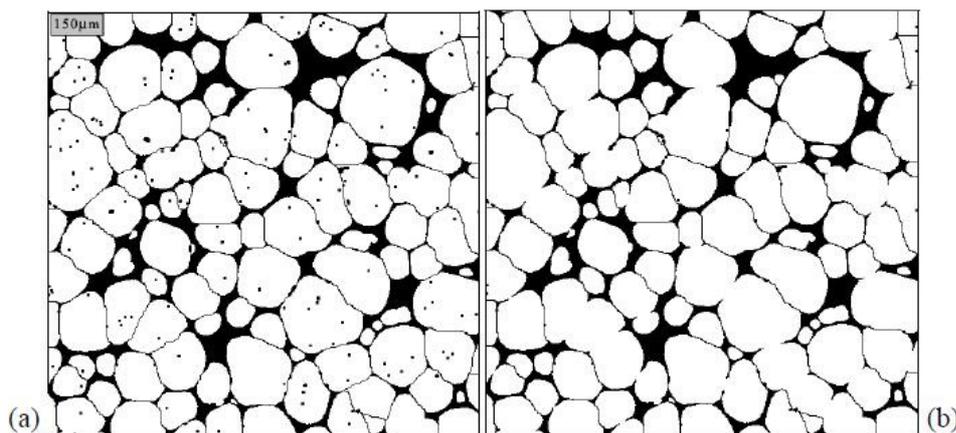


FIGURA 3.29 – Exemplo de operação de preenchimento. (a) Imagem original; (b) imagem após a operação *fill*.

Fonte: Adaptado de Paciornik e Mauricio, 2004, p. 87.

Os objetos colados ou superpostos são um dos problemas mais comuns na segmentação (GOMES, 2001). Tal problema precisa ser resolvido antes da etapa de extração de atributos, pois, caso contrário, os objetos não poderão ser corretamente identificados, contados e medidos. Para isso, utiliza-se uma técnica chamada *Watershed* (método dos divisores de água), que consiste justamente na separação de objetos que se tocam. Este método envolve basicamente três etapas: 1. Uma limiarização simples gerando uma imagem binária; 2. O cálculo do mapa de distâncias euclidianas (Transformada de Distância); 3. Obtenção dos divisores de águas separando os objetos.

O resultado da aplicação do método de *Watershed* pode ser visto na FIG. 3.30.

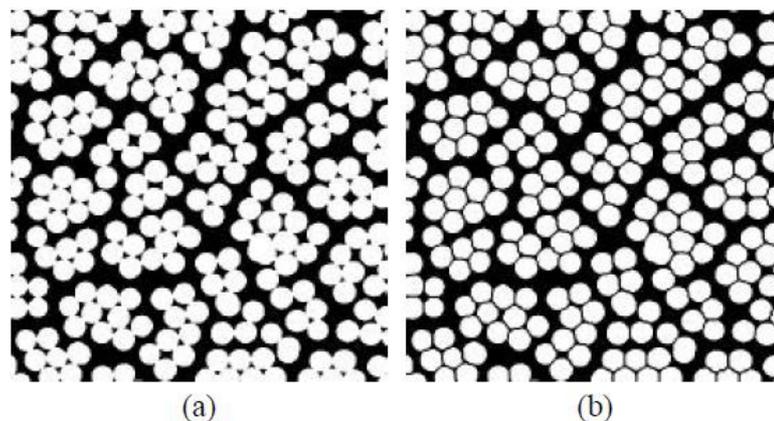


FIGURA 3.30 – Exemplo de aplicação da técnica *Watershed*. (a) Imagem original; (b) imagem após a aplicação do *Watershed*.

Fonte: Gomes, 2001, p. 59.

3.3.5 Extração de atributos, reconhecimento e classificação

Nesta etapa do processamento de imagens entra-se na fase em que se devem adquirir informações quantitativas quanto ao tamanho, forma, posição e textura dos objetos em estudo. Existem basicamente dois tipos de medidas, as medidas de campo e as medidas de região. As medidas de campo são aquelas que medem o campo da imagem como um todo, e as medidas de região referem-se à medição dos objetos da imagem independentemente.

Podem-se listar algumas das principais medidas utilizadas nesta etapa:

- a) contagem de objetos;**
- b) área;**
- c) interceptos e interseções;
- d) intensidade;
- e) textura;
- f) tamanho;
- g) forma;
- h) posição.

Como técnica aplicada neste trabalho, usaram-se as medições de área para calcular a área percentual relativa de cada fase mineral em relação às fases presentes no minério, bem como a contagem de objetos referente as partículas liberadas de uma amostra.

Finalmente, entra-se em uma área em que as informações adquiridas na etapa de extração de atributos são transformadas em conhecimento. Esta etapa denomina-se **reconhecimento e classificação**. Rosa (2008, p. 32) comenta que “as técnicas de reconhecimento de padrões são usadas para classificar objetos através de um conjunto de propriedades ou características comuns a cada classe de objetos, as quais constituem um padrão”. Frick (2008, p. 34) define que o “reconhecimento de padrões é a ciência que trata da classificação, descrição ou o agrupamento automático de objetos”.

Um projeto de reconhecimento e classificação tem basicamente três etapas, a extração das características das amostras em estudo, seleção das características mais discriminativas e um mecanismo de tomada de decisão.

“O mecanismo de tomada de decisão sobre a classe a que pertence um padrão em função de suas características é conhecido como classificador” (ROSA, 2008, p. 35, destaque em negrito nosso). Existem dois tipos de classificação, a classificação supervisionada e a classificação não supervisionada. A classificação supervisionada, técnica utilizada neste trabalho, visa uma classificação em que as classes são conhecidas ou previamente determinadas pelo usuário do sistema. Já a classificação não supervisionada utiliza a fronteira de decisão estabelecida pelo sistema, ou seja, o sistema faz uma classificação automática baseado nas semelhanças entre os objetos analisados.

3.4 Repetibilidade & Reprodutibilidade

Uma das maneiras de se quantificar e avaliar o desempenho de um sistema de medição é através do teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade (R&R). A capacidade de um avaliador de realizar medidas em uma mesma amostra é chamada de repetibilidade, e a capacidade de medição entre avaliadores diferentes é denominada de reprodutibilidade.

A variabilidade total presente em um conjunto de dados, gerados por um processo produtivo e medidos por meio de um sistema de medição, pode ser dividida em duas partes (WERKEMA, 2006). A EQ. 3.2 representa essa decomposição:

- a) variabilidade resultante do processo produtivo;
- b) variabilidade inerente ao sistema de medição.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{sistema\ de\ medição}^2 + \sigma_{processo\ produtivo}^2 \quad (3.2)$$

Levando-se em conta que a variabilidade do sistema de medição é constituída por duas componentes, repetibilidade e reprodutibilidade, a EQ. 3.2 pode ser escrita como:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{repe}^2 + \sigma_{repro}^2 + \sigma_{processo\ produtivo}^2 \quad (3.3)$$

Na FIG. 3.31 apresenta-se um fluxograma evidenciando essas componentes de variação de um conjunto de dados industrial.

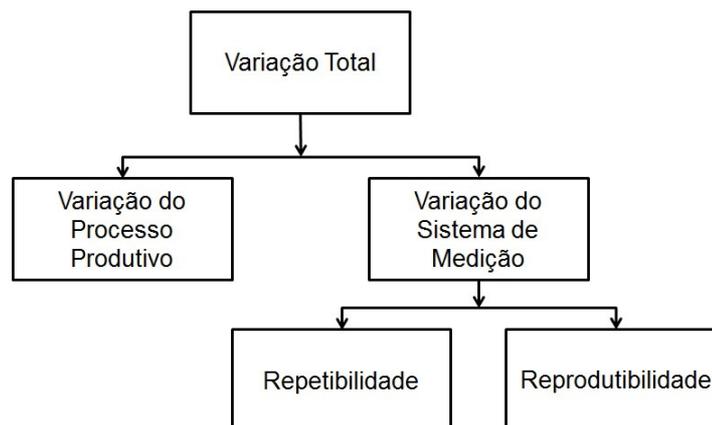


FIGURA 3.31 – Fluxograma mostrando a decomposição da variabilidade total.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Alguns fatores que influenciam na repetibilidade inadequada do sistema de medição do grau de liberação na Samarco são:

- a) gênese do minério de ferro;
- b) amostragem não representativa;
- c) erro de preparação das seções polidas;

Já na reprodutibilidade, alguns fatores que influenciam em sua baixa eficiência são:

- a) treinamento insuficiente dos operadores;
- b) utilização de diferentes instrumentos de medição;
- c) subjetividade dos avaliadores.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se os materiais e o método utilizado no trabalho.

Os materiais e equipamentos foram divididos em:

- ▶ descrição da preparação das seções polidas;
- ▶ prensa de embutimento automática;
- ▶ equipamento de polimento;
- ▶ microscópio ótico e câmera digital;
- ▶ software de análise de imagens;
- ▶ software de análise estatística.

O método de execução da parte experimental consiste de seis etapas:

- ▶ seleção das amostras e grau de liberação de referência;
- ▶ determinação das fontes de variações e do tempo das medições do grau de liberação;
- ▶ efeito da granulometria no grau de liberação da Samarco;
- ▶ aquisição de imagens;
- ▶ processamento e análise de imagens digitais;
- ▶ comparação de desempenho.

4.1 Materiais e Equipamentos

4.1.1 Descrição da preparação das seções polidas

As amostras de minério de ferro provenientes dos compostos diários do overflow dos ciclones primários chegaram ao laboratório de mineralogia já homogeneizadas e quarteadas em alíquotas de 200 a 250g. A sequência de preparação seguiu as seguintes etapas:

- ▶ verificação da identificação da amostra;
- ▶ encaminhamento do envelope ao laboratório físico onde a amostra é peneirada na malha 100# com água corrente. O material retido é colocado para secar em uma chapa de 5 a 10 minutos;
- ▶ esfriamento da amostra de 5 a 10 minutos para em seguida acondicioná-la em um envelope devidamente identificado;

- ▶ envio do envelope ao laboratório de mineralogia onde é retirada uma amostra de 3,5g e homogeneizada com 8g de pó transóptico da marca Buehler (TransOptic® 20-3400-080). Logo, o material é levado à prensa de embutimento automática onde permanece por 8 minutos para aquecimento e por 8 minutos para resfriamento, totalizando 16 minutos.

Após o término do embutimento a amostra é levada para as etapas de lixamento e polimento detalhadas a seguir:

- ▶ quebra das arestas/quinas em lixa a seco de 50# da marca Carborundum modelo Pano Metal 41 – Metalcarbo - A50;
- ▶ utilização de lixas de 240, 400 e 600# com água da marca Carborundum modelo Lixa D'água - Waterproof – 15, invertendo as direções de lixamento para melhor desbaste;
- ▶ quebra das arestas em lixas de 240, 400 ou 600# para evitar desprendimento de partículas no polimento e menor desgaste do pano;
- ▶ acréscimo na politriz de pasta de alumina da marca Struers modelo AP-A Suspension, e giro da seção em sentido horário molhando o pano com água.
- ▶ lavagem da amostra com detergente e em água corrente, secagem com papel toalha para a análise via microscópio ótico.

4.1.2 Prensa de embutimento automática

Para a preparação das seções polidas utilizou-se uma prensa de embutimento automática com bomba eletro-hidráulica da marca Struers modelo CitoPress-1 (FIG. 4.1). A máquina possui um cilindro, uma unidade de aquecimento e outra de resfriamento, um pistão inferior e um topo fechado com pistão superior.



FIGURA 4.1 – Foto da prensa de embutimento automática.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.1.3 Equipamento de polimento

A politriz utilizada para polimento das superfícies das seções para a análise do grau de liberação é da marca Pantec modelo Polipan – 2d (FIG. 4.2).



FIGURA 4.2 – Foto do equipamento de polimento.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.1.4 Microscópio ótico e câmera digital

Foram utilizados um microscópio ótico de luz refletida, alocado na unidade de Ubu no laboratório de microscopia da Samarco Mineração S.A. no município de Anchieta, ES, e outro alocado na unidade de Germano no laboratório de mineralogia da Samarco Mineração S.A. em Mariana, MG. Esses microscópios são da marca Zeiss modelo

Imer.M2m com platina motorizada e capacidade de aumento de até 1000 vezes. Acoplado a ele há uma câmera digital também da marca Zeiss modelo ICc 1 que foi utilizada para captura e digitalização das imagens.

Na FIG. 4.3 apresenta-se uma foto do microscópio ótico de luz refletida e da câmera de captura de imagens.



FIGURA 4.3 – Foto do microscópio ótico de luz refletida e da câmera digital da marca Zeiss.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.1.5 Software de análise de imagens

Foi utilizado o software AxioVision 4.8 (2009) da marca Zeiss para a criação das rotinas de análise de imagens.

4.1.6 Software de análise estatística

O software utilizado foi o Minitab versão 16 para a análise das informações e para os testes estatísticos.

4.2 Métodos

4.2.1 Seleção das amostras e grau de liberação de referência

Foram selecionadas 12 seções polidas do ano de 2011, sendo seis do Concentrador I e seis do Concentrador II (TAB. 4.1). O critério utilizado foi diversificar as amostras dos dois concentradores, bem como selecionar amostras com valores de grau de liberação mais altos e mais baixos. Essas amostras pertencem à análise de rotina da Samarco que geram o resultado diário de grau de liberação. Os resultados dessas amostras de rotina são encontrados no sistema de tecnologia de informação para gerenciamento de dados da Samarco, o *Manufacturing Execution Systems* (MES).

TABELA 4.1

Amostras selecionadas da rotina Samarco.

Amostra	Concentrador	Data	Grau de Liberação (%)
1	I	4-jan-11	97,6
2	I	15-jan-11	88,8
3	I	9-fev-11	92,7
4	I	28-mai-11	86,2
5	I	17-jul-11	95,3
6	I	2-out-11	92,4
7	II	13-fev-11	94,9
8	II	12-abr-11	97,5
9	II	31-jul-11	96,5
10	II	20-ago-11	88,8
11	II	19-set-11	94,4
12	II	2-out-11	88,3

Fonte: Samarco Mineração S.A.

As 12 seções polidas foram analisadas seguindo os procedimentos padrão da Samarco através do microscópio ótico em luz refletida utilizando o método tradicional de Gaudin por contagem de grãos (mínimo 500 partículas) e suportado por uma planilha elaborada para essas análises. As análises foram realizadas na fração +100# (+0,15mm).

Como valor de referência foi determinado novamente o grau de liberação das 12 amostras utilizando o método de contagem pelos laboratoristas variando o número de partículas analisadas, ou seja, foi calculado o grau de liberação a cada 50 partículas

até chegar a aproximadamente 1000 partículas. No patamar de 600 partículas analisadas os valores se estabilizam tornando possível o cálculo de valores de referência.

Esses resultados são a base de comparação para a avaliação de desempenho das análises do grau de liberação determinado pelo software de análise de imagens ao final do trabalho.

4.2.2 Determinação das fontes de variações e do tempo das medições do grau de liberação

Nesta etapa foram quantificadas as fontes de variações das medições do grau de liberação. A variação total da medição é proveniente de duas fontes, a inerente ao processo produtivo e a do sistema de medição. Para tal, foi executado um teste de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) no Minitab para avaliar e mensurar a precisão do sistema atual de medição do grau de liberação, bem como os vícios ou tendências dessas análises.

Paralelamente, foram determinados os tempos de medição de cada laboratorista na geração do resultado de grau de liberação.

A estruturação para o teste de repetibilidade e reprodutibilidade é apresentada na FIG. 4.4.

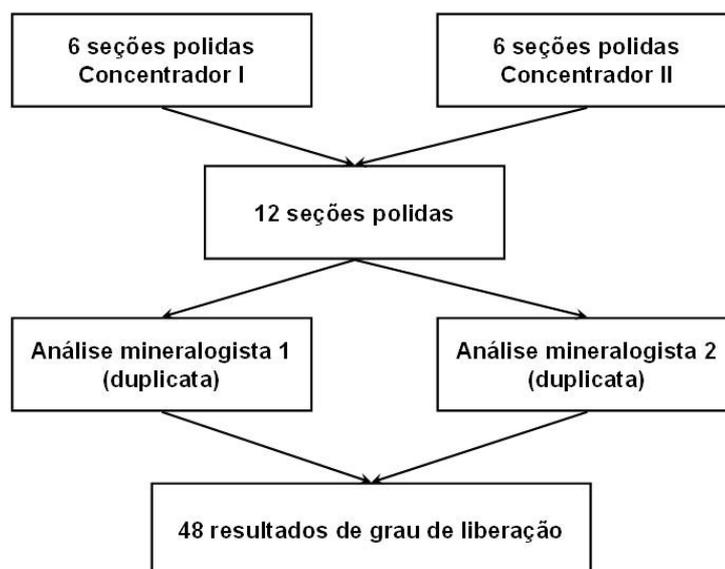


FIGURA 4.4 – Fluxograma com as etapas de execução para os testes de R&R.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.2.3 Efeito da granulometria no grau de liberação da Samarco

Dez amostras utilizadas para as medições do grau de liberação de rotina da Samarco foram peneiradas em duas malhas, 100# (0,15mm) e 65# (0,21mm). Foram comparados os resultados da metodologia atual (liberação do quartzo do material retido em 100#) *versus* o resultado do grau de liberação do material na faixa -65# +100#.

A TAB. 4.2 apresenta os valores do grau de liberação dessas amostras de rotina determinados pelo método de contagem de Gaudin na fração retida em 100#.

TABELA 4.2

Resultados das amostras da rotina Samarco.

Amostra	Concentrador	Data	Grau de Liberação (%)
1	I	22-dez-11	91,9
2	II	22-dez-11	91,0
3	I	23-dez-11	93,3
4	II	23-dez-11	92,2
5	I	24-dez-11	91,6
6	II	24-dez-11	92,8
7	I	26-dez-11	91,4
8	II	26-dez-11	92,2
9	I	27-dez-11	91,1
10	II	27-dez-11	91,8

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.2.4 Aquisição de Imagens

Esta etapa foi responsável pela digitalização e aquisição das imagens das doze amostras de referência. É uma etapa fundamental para este tipo de trabalho, pois uma aquisição deficiente da imagem pode gerar dificuldades nas etapas posteriores, e até mesmo inviabilizar a utilização das ferramentas dos softwares de análise de imagens. Portanto, é necessário ter um cuidado especial na iluminação, no nivelamento da seção polida e demais fatores que geram as imperfeições.

Para isso foi definida uma parametrização padrão para as imagens captadas no microscópio e câmera digital da Zeiss. Essas imagens serviram como base para a elaboração das etapas de processamento no software AxioVision. O objetivo desta padronização foi uniformizar as imagens de maneira a facilitar o processamento e viabilizar a extração de atributos. No software AxioVision foi criada uma função que permite carregar essas configurações chamada “Parametrização Grau de Liberação.zvhs”.

Foi montada uma imagem mosaico de cada uma das 12 seções polidas utilizando a função MosaiX do software. O objetivo desse mosaico é permitir o processamento único de uma amostra com no mínimo 500 partículas analisadas, como definido na metodologia padrão do grau de liberação de Gaudin.

A seguir descrevem-se as principais parametrizações de aquisição das imagens digitais para o processamento no software.

Configuração do Microscópio:

- ▶ Polarização cruzada em 90°
- ▶ ND Filter = 100%
- ▶ Aperture RL: >0,20
- ▶ Voltagem = 10,0V
- ▶ Aumento de 100x: Objetiva 10x e Ocular 10x

Configuração da Aquisição:

- ▶ Auto Focus
- ▶ Tempo de exposição = 40ms
- ▶ Shading Correction desabilitado
- ▶ Função Linear habilitada
- ▶ Cortinas do ambiente fechadas para evitar variação da luz natural
- ▶ Utilização de luz artificial
- ▶ Resolução da câmera: 1388 x 1038 8-Bit Mono (escala de cinza)

Configuração do Mosaico:

- ▶ Mosaico 12x12
- ▶ Scan Mode: Comb
- ▶ Auto Focus: Every tile
- ▶ Overlap: 10%
- ▶ Retangular
- ▶ Stitching com SobelSize Off
- ▶ Convert Tile Images

4.2.5 Processamento e análise de imagens digitais

Nesta etapa foram desenvolvidas rotinas de análise automática para o grau de liberação utilizando o software que a Samarco possui licença de uso, o AxioVision.

Baseado nos passos elementares da metodologia de processamento e análise digital de imagens (VIEIRA; PACIORNIK, 2001, *apud* GOMES, 2007), foi formulado um fluxograma das etapas a serem seguidas na parte experimental deste trabalho (FIG. 4.5).

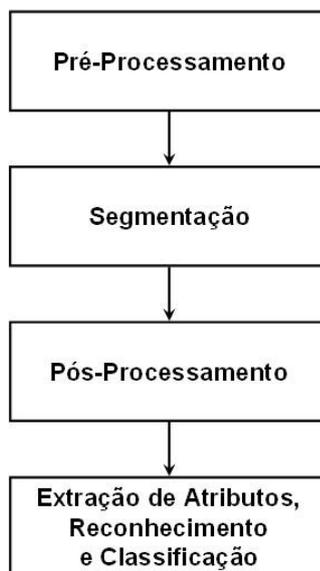


FIGURA 4.5 – Fluxograma com as etapas de execução para o processamento e análise das imagens.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

4.2.6 Comparação de desempenho

Com o objetivo de avaliar a eficácia das rotinas automáticas desenvolvidas no software AxioVision, foram comparados os resultados do grau de liberação desenvolvido pelo programa com os resultados do grau de liberação de referência. Para isso, foram utilizadas as ferramentas estatísticas de Teste de Hipóteses, Regressão Linear e teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade pelo método ANOVA.

Para avaliar o tempo na geração dos resultados do grau de liberação, foram comparados os tempos captados pelas laboratoristas *versus* os tempos obtidos no software de análise de imagens.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Grau de Liberação de Referência

Determinou-se o grau de liberação pelo método tradicional de contagem de cada uma das 12 seções polidas variando o número de partículas analisadas. Os resultados são apresentados nas FIG. 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4

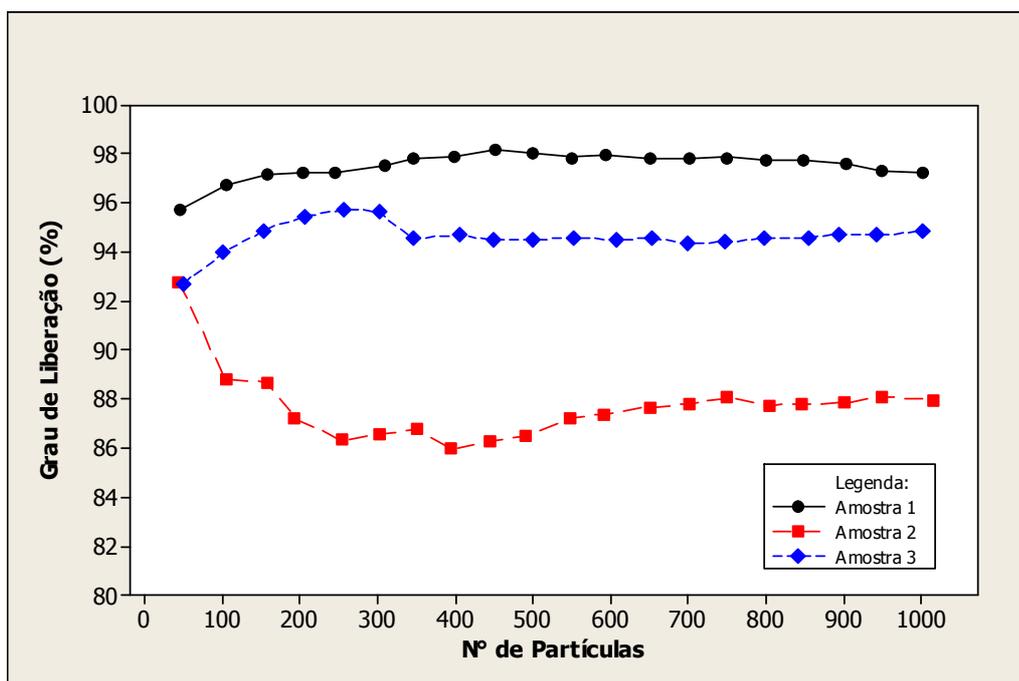


FIGURA 5.1 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 1, 2 e 3.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

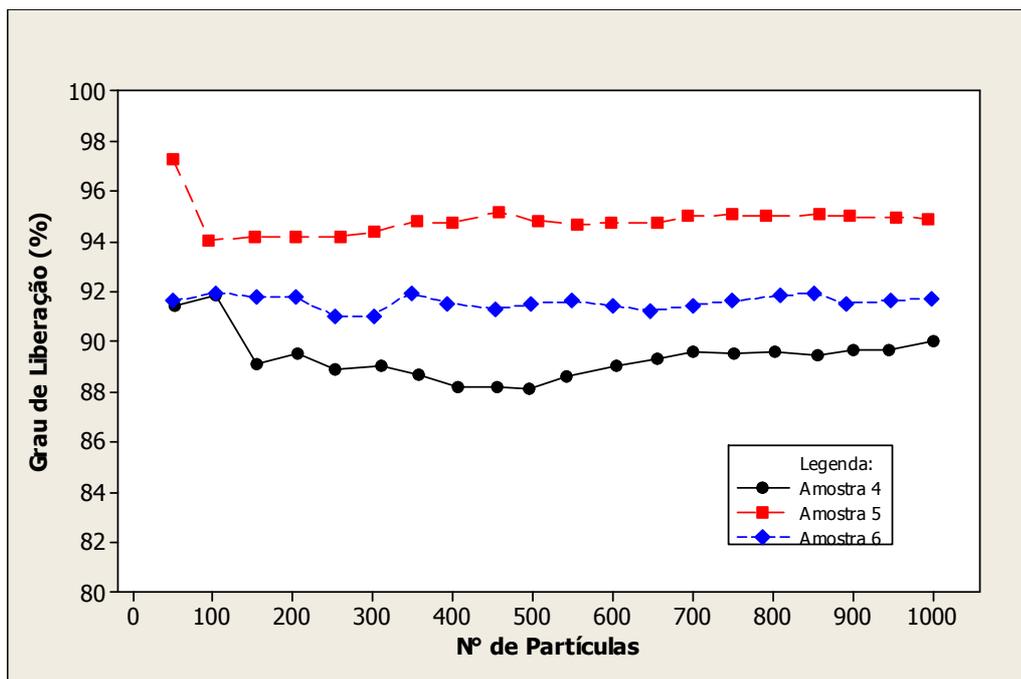


FIGURA 5.2 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 4,5 e 6.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

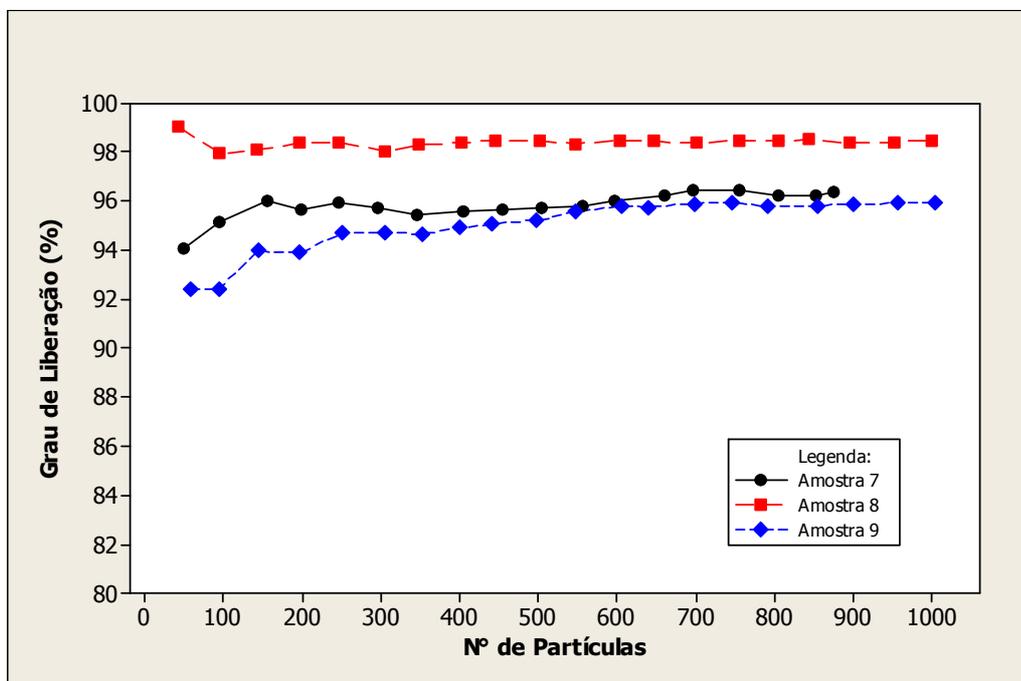


FIGURA 5.3 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 7,8 e 9.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

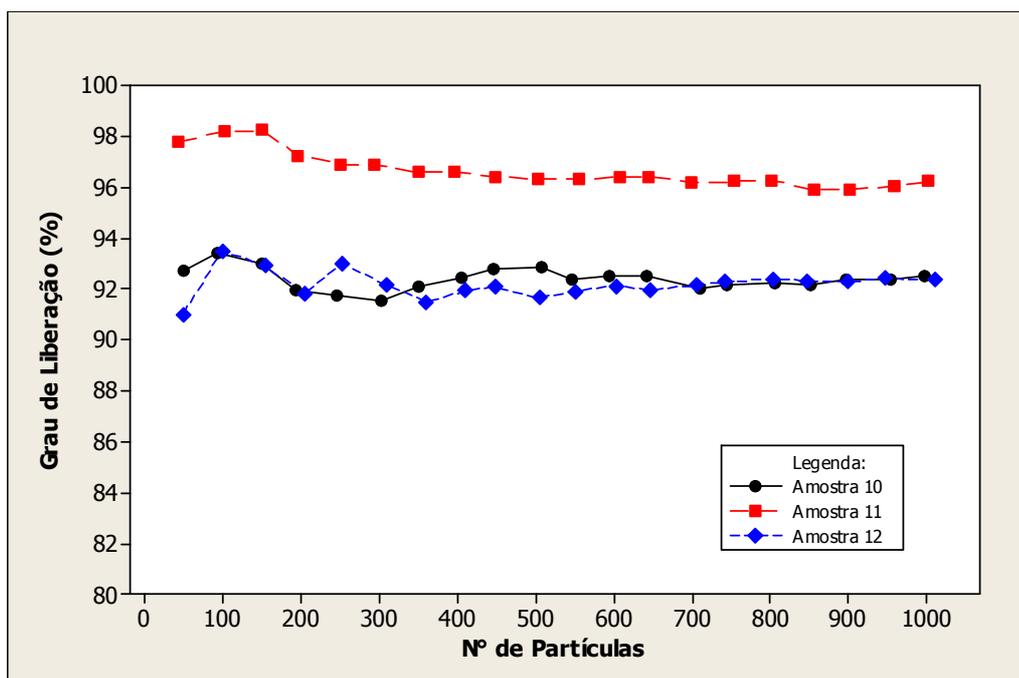


FIGURA 5.4 – Gráfico sequencial mostrando a estabilização dos valores do grau de liberação das amostras 10,11 e 12.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Definiu-se como premissa para o cálculo dos valores do grau de liberação de referência a média dos pontos acima de 500 partículas analisadas, pois é a região onde os valores se estabilizam.

Na TAB. 5.1 apresentam-se os valores de referência do grau de liberação das 12 seções polidas utilizadas no trabalho.

TABELA 5.1

Valores de referência do grau de liberação das 12 amostras.

Amostra	Concentrador	Data	Grau de Liberação (%)
1	I	4-jan-11	97,7
2	I	15-jan-11	87,7
3	I	9-fev-11	94,6
4	I	28-mai-11	89,3
5	I	17-jul-11	94,5
6	I	2-out-11	91,6
7	II	13-fev-11	96,0
8	II	12-abr-11	98,5
9	II	31-jul-11	95,8
10	II	20-ago-11	92,4
11	II	19-set-11	96,2
12	II	2-out-11	92,2

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.1.1 Comparação do grau de liberação de rotina e de referência

Na FIG. 5.5 apresentam-se os gráficos do grau de liberação de rotina (método atual Samarco) e de referência das 12 amostras. Observa-se que as duas curvas seguem uma tendência, ou seja, há uma correlação entre elas, apesar de algumas amostras apresentarem valores diferentes.

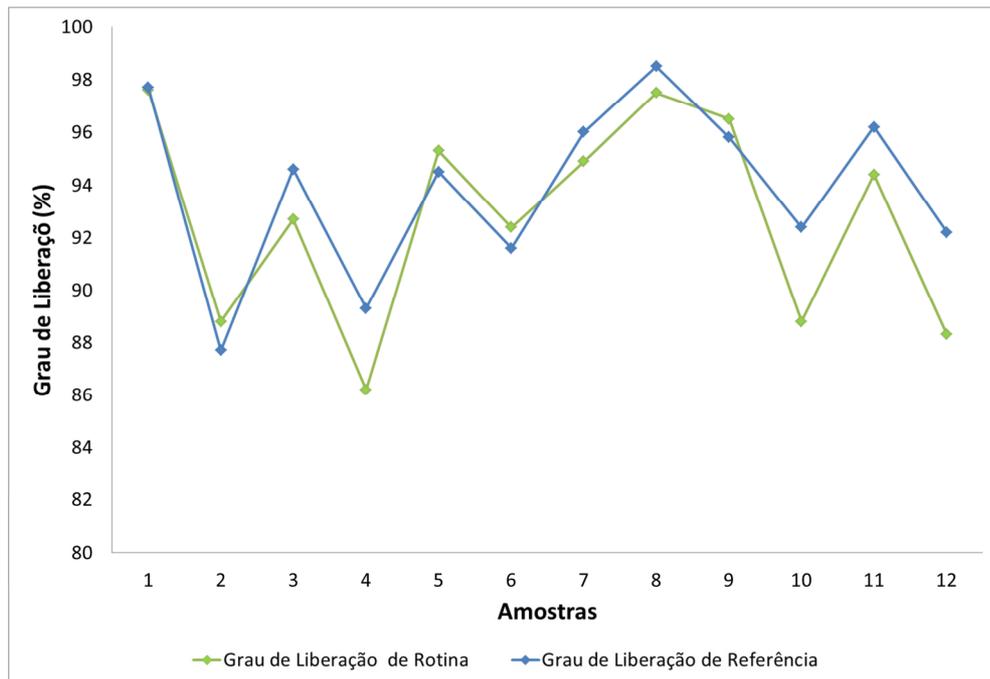


FIGURA 5.5 – Gráfico sequencial com os valores do grau de liberação de rotina e de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A correlação entre os valores de rotina e de referência foi mensurada através de uma regressão linear, onde o R^2 resultou em 79% (FIG. 5.6).

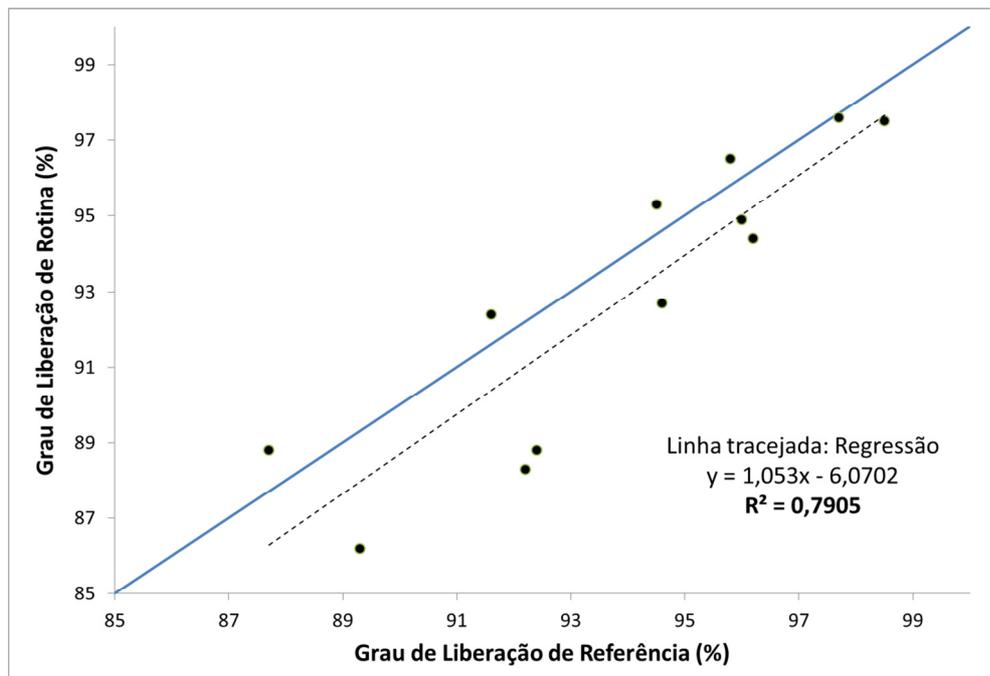


FIGURA 5.6 – Correlação entre os valores do grau de liberação de rotina e de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Na FIG. 5.7 apresenta-se um boxplot com as médias dos dois conjuntos de valores. Fazendo uma análise visual observa-se que o grau de liberação da rotina é menor do que o grau de liberação de referência, com uma diferença absoluta de 1,1. Entretanto, essa observação não é confirmada pelo teste de hipótese realizado no Minitab, onde as alternativas testadas foram:

$$H_0 : \mu_{\text{grau de liberação de rotina}} = \mu_{\text{grau de liberação de referência}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{grau de liberação de rotina}} \neq \mu_{\text{grau de liberação de referência}}$$

Resultado:

Paired T-Test and CI: GL de rotina (%); GL de referência (%)

	N	Mean	StDev	SE Mean
GL de rotina (%)	12	92,78	3,91	1,13
GL de referência (%)	12	93,88	3,30	0,95
Difference	12	-1,092	1,797	0,519

95% CI for mean difference: (-2,234; 0,050)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -2,10 **P-Value = 0,059**

Como o p-valor do teste de hipótese resultou em um valor maior que 0,05, aceita-se H_0 , e pode-se afirmar que a diferença entre as médias do grau liberação dos dois dados amostrais é devido à variação natural do processo, ou seja, não há uma diferença estatisticamente significativa entre o grau de liberação de rotina e o grau de liberação de referência.

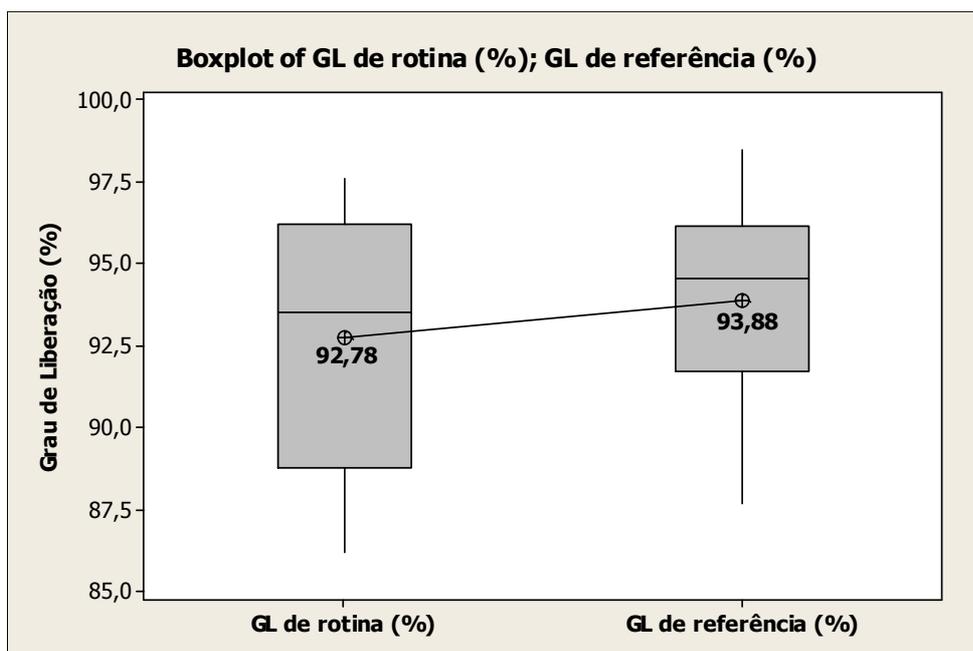


FIGURA 5.7 – Boxplot do grau de liberação de rotina e de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Na FIG. 5.8 o histograma do grau de liberação de rotina e de referência mostra que a variabilidade entre os dados é similar e seguem uma distribuição normal o que valida o teste de hipótese realizado.

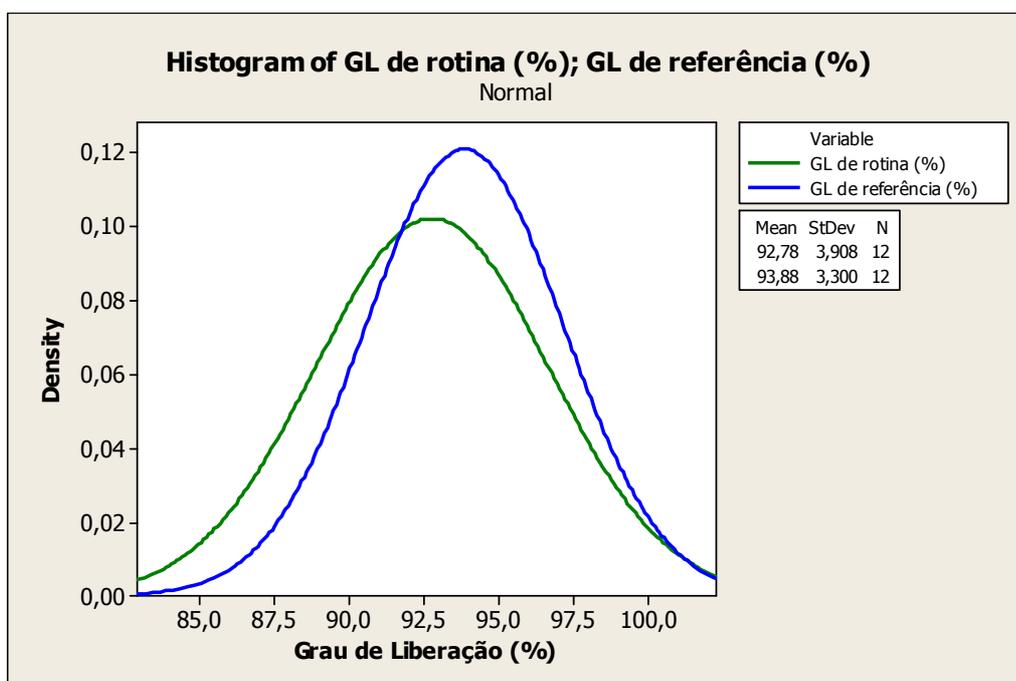


FIGURA 5.8 – Histograma do grau de liberação de rotina e de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.2 Determinação das Fontes de Variação e do Tempo das Medições do Grau de Liberação

Na TAB. 5.2 apresentam-se os resultados do grau de liberação e o tempo das 24 análises realizadas pelo método atual da Samarco e na TAB. 5.3 apresentam-se as duplicatas referentes às mesmas amostras.

TABELA 5.2

Resultado do grau de liberação e do tempo das análises.

Amostra	Laboratorista 1		Laboratorista 2	
	Grau de Liberação (%)	Tempo (min's")	Grau de Liberação (%)	Tempo (min's")
12	90,6	19'01"	90,7	13'57"
10	91,2	17'35"	88,1	14'44"
9	97,6	12'19"	93,2	10'58"
4	87,6	14'06"	84,6	15'12"
2	86,1	19'02"	84,3	17'41"
11	95,7	10'51"	94,0	9'30"
6	92,5	16'13"	90,0	12'41"
8	96,9	14'23"	94,3	12'02"
7	94,8	12'03"	91,0	15'05"
5	94,5	13'31"	91,4	15'17"
3	92,1	13'46"	88,7	15'09"
1	96,5	11'18"	95,2	11'40"

Fonte: Samarco Mineração S.A.

TABELA 5.3

Duplicata das análises do grau de liberação e do tempo.

Amostra	Laboratorista 1		Laboratorista 2	
	Grau de Liberação (%) Laboratorista 1	Tempo (min's")	Grau de Liberação (%) Laboratorista 2	Tempo (min's")
12	89,1	15'45"	87,4	14'03"
10	89,4	17'22"	88,3	14'07"
9	95,9	12'38"	94,6	10'16"
4	88,6	14'26"	86,3	15'43"
2	87	18'59"	79,5	21'04"
11	95,2	11'11"	93,3	9'13"
6	89,4	17'56"	89,9	14'27"
8	97,2	15'23"	95,7	11'49"
7	93,1	13'32"	90,6	13'19"
5	94,5	17'29"	90,7	13'44"
3	90,5	17'14"	89,5	16'01"
1	94	15'11"	91,5	13'35"

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Os resultados apresentados nas TAB. 5.2 e 5.3 são o *input* para a análise de R&R.

A seguir, foram avaliadas qualitativamente e quantitativamente as fontes de variações relacionadas ao sistema de medição atual da Samarco.

5.2.1 Avaliação qualitativa

A FIG. 5.9 apresenta a capacidade da laboratorista 1 em realizar as mesmas medidas, ou seja, a repetibilidade, e a FIG. 5.10 a capacidade da laboratorista 2 em realizar as mesmas medidas.

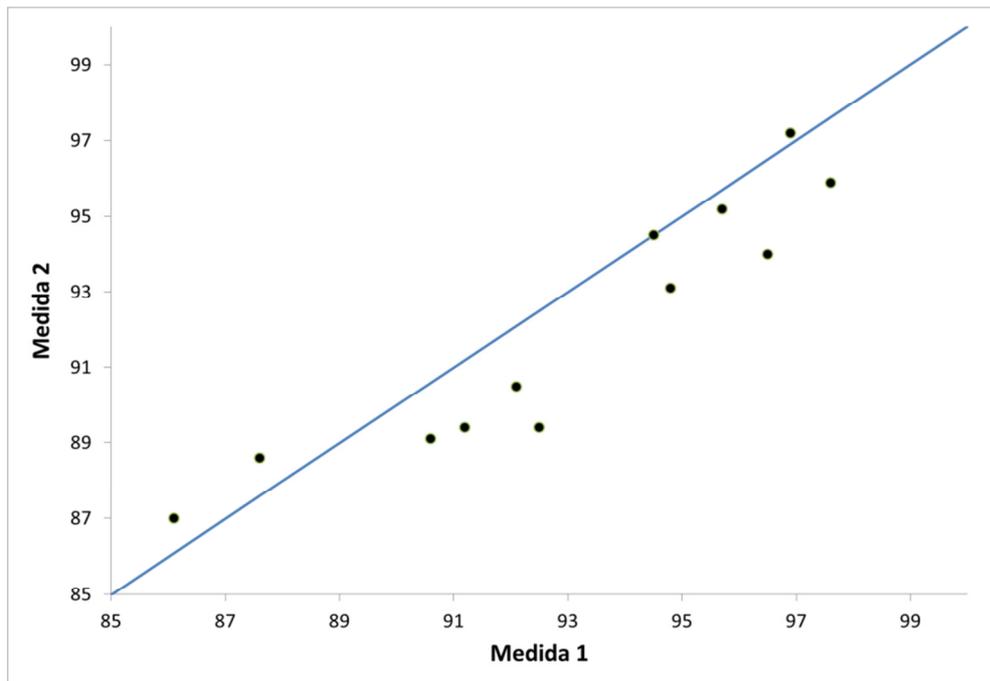


FIGURA 5.9 – Dispersão mostrando as medições realizadas pela laboratorista 1.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

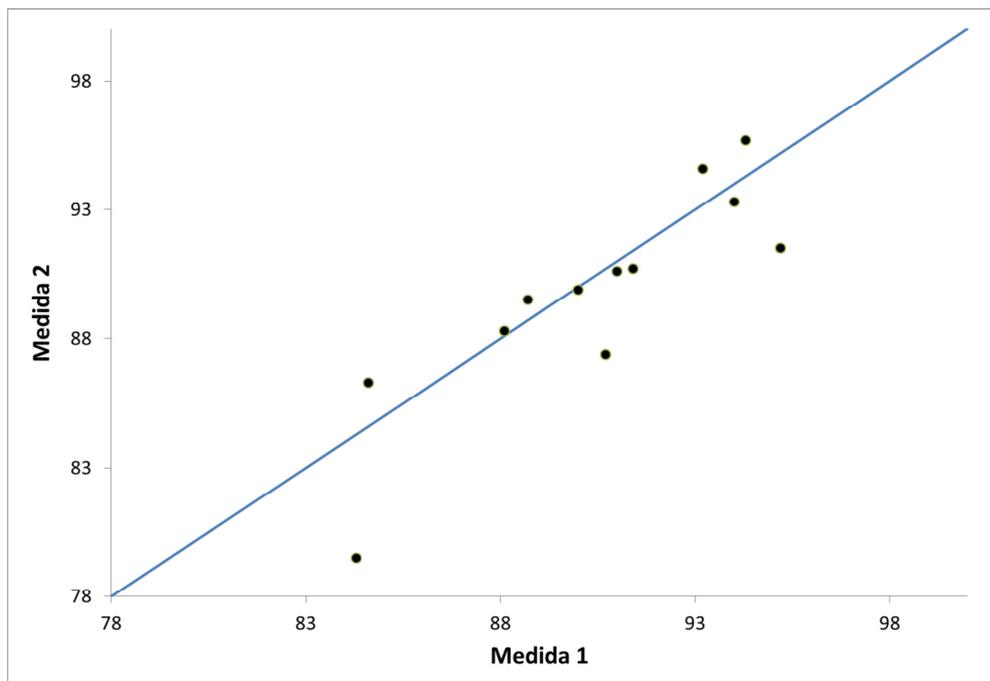


FIGURA 5.10 – Dispersão mostrando as medições realizadas pela laboratorista 2.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

O diagrama de dispersão do comportamento das medições entre as laboratoristas, ou seja, a reprodutibilidade é mostrada na FIG. 5.11. Pode-se observar que a

laboratorista 2 realizou medições com valores inferiores ao da laboratorista 1. Essa diferença é confirmada no boxplot da FIG. 5.12, onde se mostram as médias realizadas das duas laboratoristas.

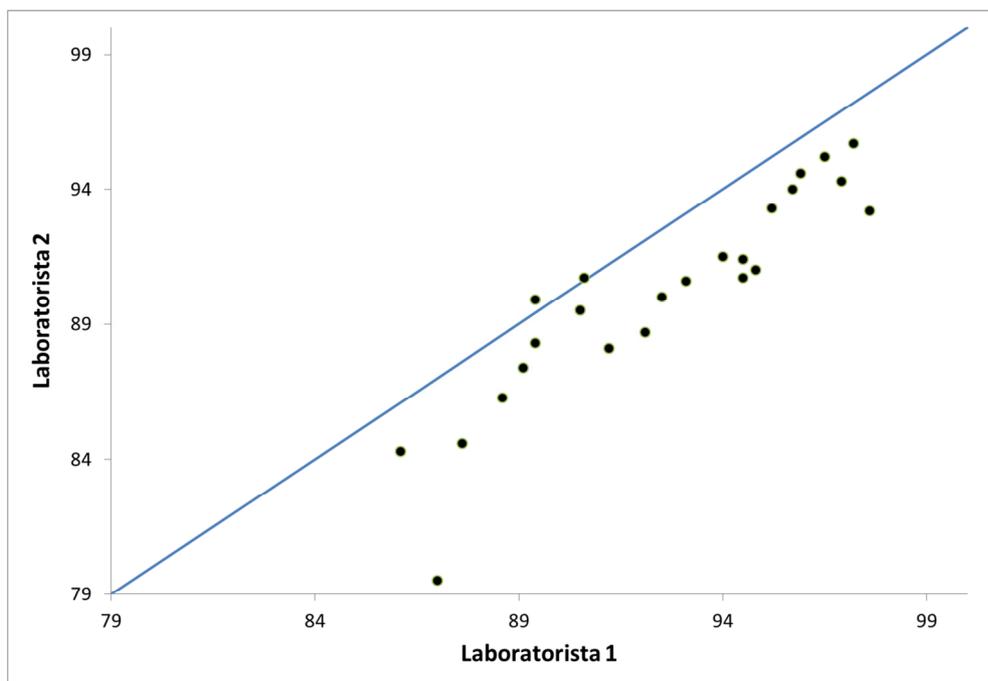


FIGURA 5.11 – Dispersão mostrando as medições realizadas pelas laboratoristas 1 e 2.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

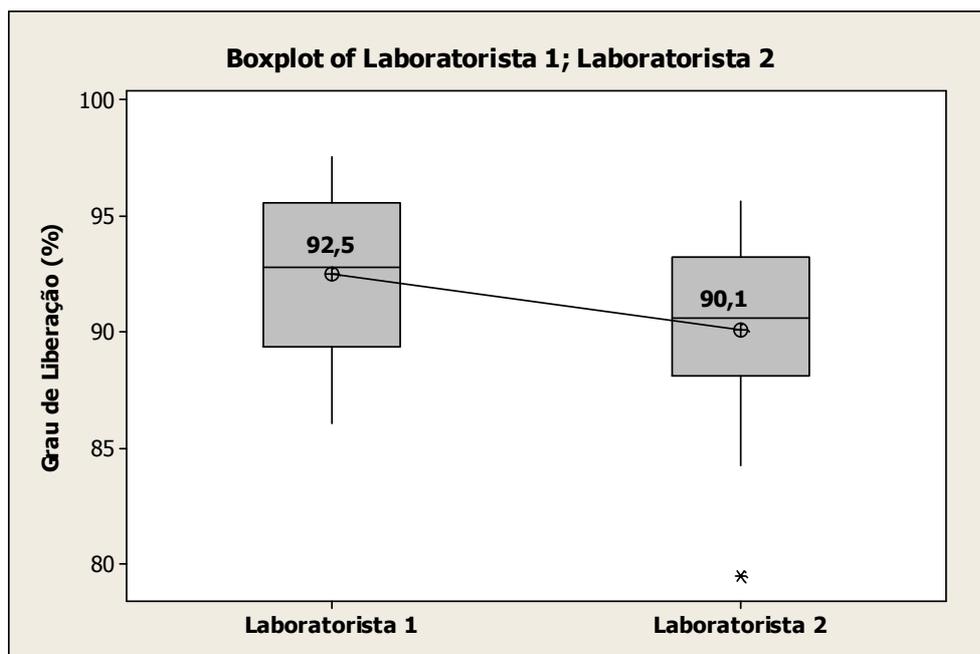


FIGURA 5.12 – Boxplot com a média do grau de liberação das duas laboratoristas.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Com relação aos tempos praticados pelas laboratoristas, observa-se que a laboratorista 1 demora mais tempo a determinar o grau de liberação do que a laboratorista 2 (FIG. 5.13).

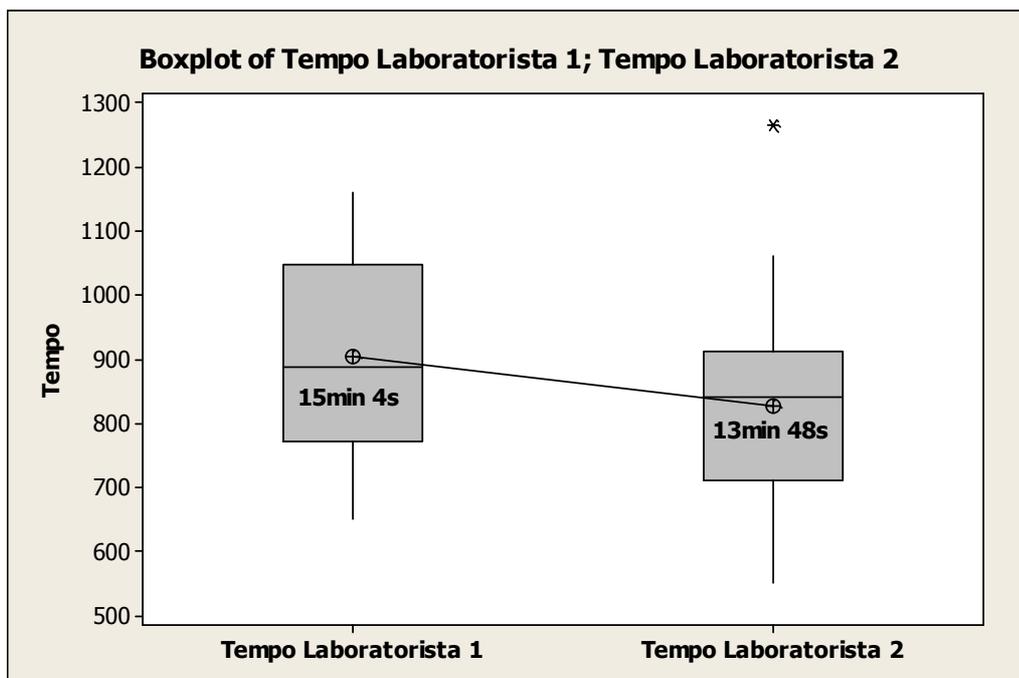


FIGURA 5.13 – Boxplot com a média de tempo das duas laboratoristas.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.2.2 Avaliação quantitativa

5.2.2.1 Teste de hipótese para a medição do tempo

Através de um teste de hipótese, pôde-se comprovar estatisticamente que as médias dos tempos das laboratoristas 1 e 2 são diferentes.

Hipóteses:

$$H_0 : \mu_{\text{tempo laboratorista 1}} = \mu_{\text{tempo laboratorista 2}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{tempo laboratorista 1}} \neq \mu_{\text{tempo laboratorista 2}}$$

Resultado:

Paired T-Test and CI: Tempo Laboratorista 1; Tempo Laboratorista 2

	N	Mean	StDev	SE Mean
Tempo Laboratorista 1	24	903,8	157,9	32,2
Tempo Laboratorista 2	24	828,2	157,6	32,2
Difference	24	75,6	129,7	26,5

95% CI for mean difference: (20,8; 130,4)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 2,86 **P-Value = 0,009**

Como o p-valor do teste de hipótese resultou em menor que 0,05, pode-se afirmar que as médias dos tempos na determinação do grau de liberação praticadas pelas duas laboratoristas são estatisticamente diferentes.

5.2.2.2 Teste de hipótese para as médias do grau de liberação

Pôde-se comprovar estatisticamente através de um teste de hipótese que as médias do grau de liberação obtidas pelas laboratoristas 1 e 2 são diferentes.

Hipóteses:

$$H_0 : \mu_{\text{laboratorista 1}} = \mu_{\text{laboratorista 2}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{laboratorista 1}} \neq \mu_{\text{laboratorista 2}}$$

Resultado:

Paired T-Test and CI: Laboratorista 1; Laboratorista 2

Paired T for Laboratorista 1 - Laboratorista 2

	N	Mean	StDev	SE Mean
Laboratorista 1	24	92,500	3,484	0,711
Laboratorista 2	24	90,117	3,864	0,789
Difference	24	2,383	1,608	0,328

95% CI for mean difference: (1,704; 3,062)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = 7,26 **P-Value = 0,000**

Como o p-valor do teste de hipótese resultou em menor que 0,05, aceita-se H_1 , podendo afirmar que as médias praticadas pelas duas laboratoristas são diferentes, e não é apenas devido a variação natural do processo, mas sim porque há realmente uma diferença estatisticamente significativa.

5.2.2.3 Teste de repetibilidade e reprodutibilidade

De forma gráfica a FIG. 5.14 apresenta o resultado do teste de repetibilidade e reprodutibilidade do Minitab. As barras de cor laranja representam as contribuições na variação total da medição, e onde se lê *Part-to-Part* significa a contribuição do processo produtivo, e *Gage R&R* representa a contribuição (Repetibilidade + Reprodutibilidade).

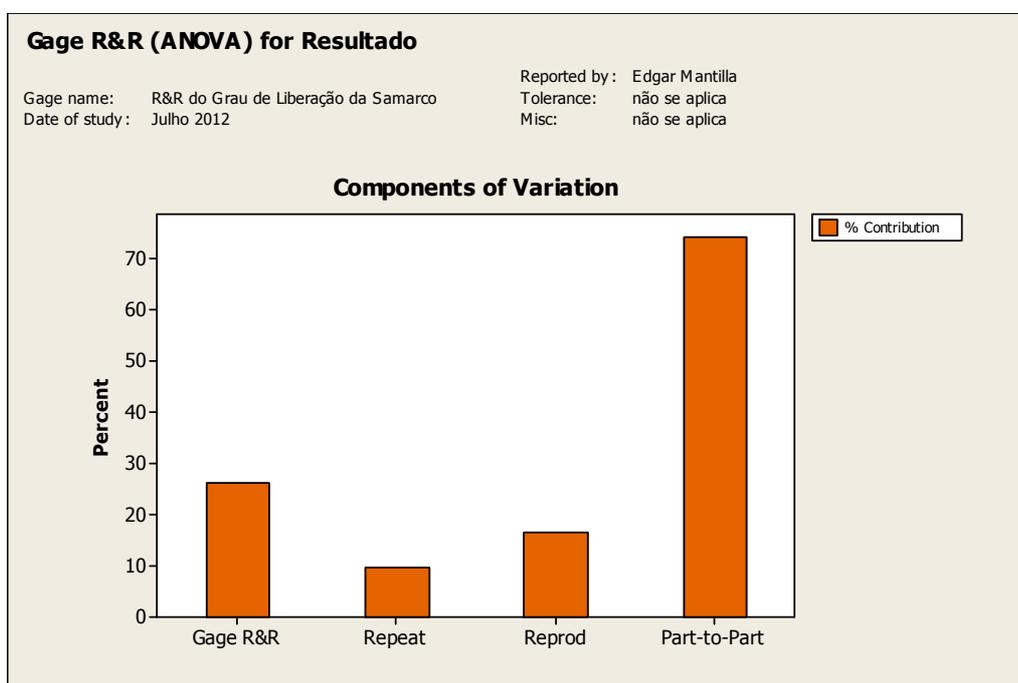


FIGURA 5.14 – Resultado gráfico do teste de R&R.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A seguir apresenta-se o resultado do teste R&R do Minitab.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	4,3850	26,03
<u>Repeatability</u>	1,6120	<u>9,57</u>
<u>Reproducibility</u>	2,7730	<u>16,46</u>
Laboratorist	2,7730	16,46
<u>Part-To-Part</u>	12,4613	<u>73,97</u>

Total Variation	16,8464	100,00	
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	2,09404	12,5643	51,02
Repeatability	1,26966	7,6180	30,93
Reproducibility	1,66522	9,9913	40,57
Laboratorist	1,66522	9,9913	40,57
Part-To-Part	3,53006	21,1804	86,01
Total Variation	4,10443	24,6266	100,00

Number of Distinct Categories = 2

Baseado na EQ. (3.3) apresentada na seção 3.4, os percentuais de contribuições das variações do sistema de medição e do processo produtivo na variação total são indicados na EQ (5.1):

$$\sigma_{total}^2 = 9,57\% + 16,46\% + 73,97\% \quad (5.1)$$

O %Study Var (%SV) de 51,02% remete a comparação do desvio-padrão *Total Gage R&R* com o desvio-padrão total. Usualmente valores acima de 30% são passíveis de melhoria do sistema de medição. O *Number of Distinct Categories = 2* informa que o sistema de medição tem a capacidade de distinguir dois grupos dentro dos dados do processo analisado.

Baseado nesses resultados pode-se afirmar que o sistema de medição precisa ser melhorado para que sejam alcançados níveis de confiabilidade e variabilidade aceitáveis. Com a aplicação do software de análise de imagens espera-se eliminar as frações de variações de repetibilidade e reprodutibilidade, diminuindo a variabilidade total das análises e consequentemente aumentando a precisão analítica do método.

5.3 Efeito da granulometria no grau de liberação da Samarco

O comportamento do grau de liberação de duas faixas granulométricas diferentes é apresentado na FIG. 5.15. A curva em vermelho representa os resultados do grau de liberação da maneira que é feita atualmente na Samarco, ou seja, determinada na fração +100# (0,15mm). A curva de cor preta representa as análises das mesmas amostras de rotina bitoladas nas frações +100# -65#.

Ao limitar a faixa granulométrica das amostras em +100# -65# obtêm-se uma homogeneidade no tamanho das partículas, excluindo as partículas grossas das análises, que tendem a ser menos liberadas, e desta forma o grau de liberação da amostra tende a ficar com valores maiores.

Portanto, quando a curva em vermelho está abaixo da curva preta, é uma evidência de que as partículas grossas estão influenciando nos resultados do grau de liberação.

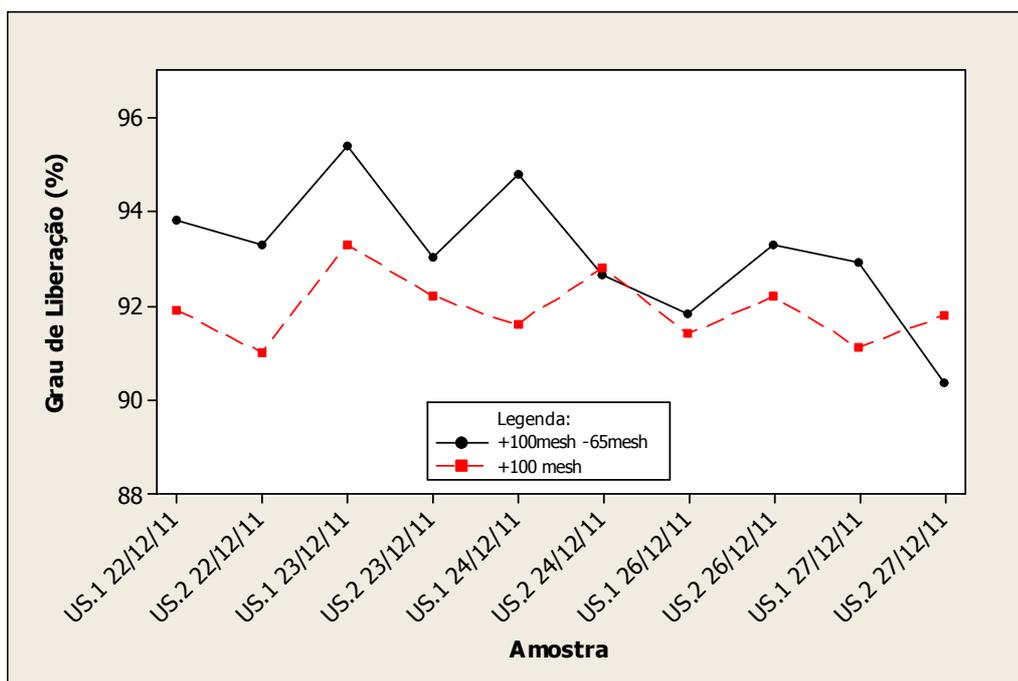


FIGURA 5.15 – Gráfico mostrando o comportamento do grau de liberação de diferentes faixas granulométricas.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.4 Aquisição das Imagens Digitais

Na FIG. 5.16, para efeito de exemplificação, observa-se uma imagem mosaico digitalizada da amostra 1 (seção polida analisada no dia 4/1/11 Usina 1). Cada imagem mosaico digitalizada foi captura com um aumento de 100x e tem aproximadamente 164MB de tamanho ocupado no Hard Disk.

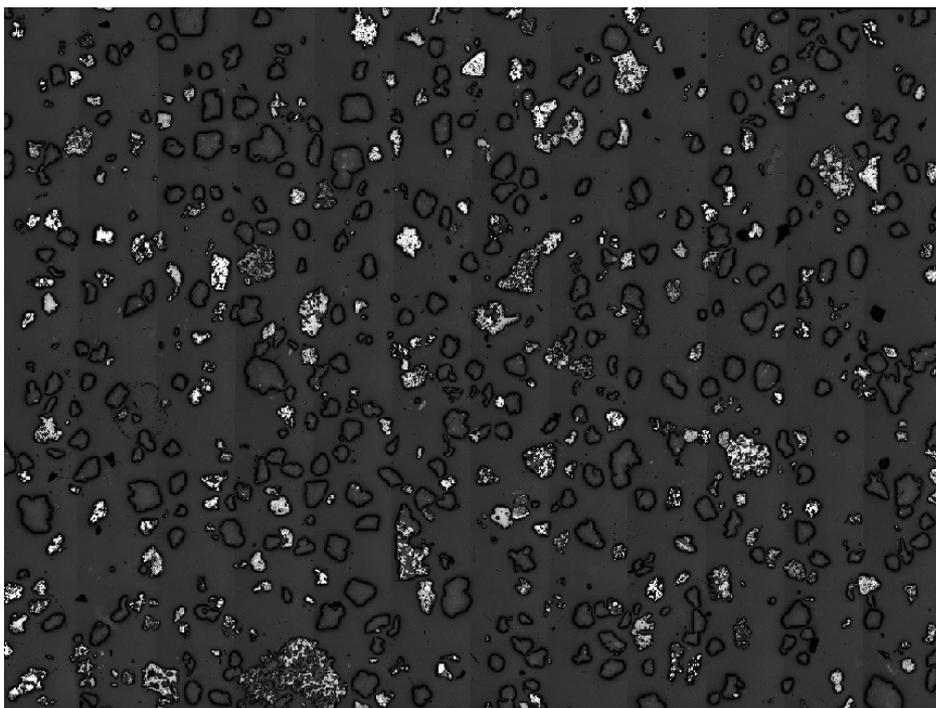


FIGURA 5.16 – Imagem mosaico digitalizada da amostra 1, aumento de 100x.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.5 Processamento e Análise de Imagens Digitais

Foi desenvolvido uma rotina de processamento automática no software AxioVison para o cálculo do grau de liberação de quartzo.

5.5.1 Descrição das etapas e das técnicas utilizadas na rotina automática

A rotina automática desenvolvida no software possui 41 etapas, sendo que 3 são do pré-processamento, 4 de segmentação, 25 de pós-processamento e 9 de extração de atributos.

No ANEXO A pode-se visualizar a sequência completa das etapas da rotina automática desenvolvida no software.

Resumidamente, na FIG. 5.17, apresentam-se as principais técnicas de processamento e análise de imagens digitais utilizadas na rotina automática do cálculo do grau de liberação.

Etapa	Técnica (nome no software)
Pré-Processamento	Filtro Sigma
Pré-Processamento	Delineação (Unsharp Masking)
Segmentação	Limiarização (Thresholds Interactive)
Pós-Processamento	Scrap
Pós-Processamento	Erosão
Pós-Processamento	Dilatação
Pós-Processamento	Fill
Extração de Atributos	Contagem de Objetos
Extração de Atributos	Área

FIGURA 5.17 – Principais técnicas de processamento e análise de imagens utilizadas na rotina automática.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

O filtro sigma é uma importante ferramenta utilizada na rotina de processamento das imagens e tem como objetivo “limpar” a imagem e facilitar as etapas posteriores de processamento (FIG. 5.18).

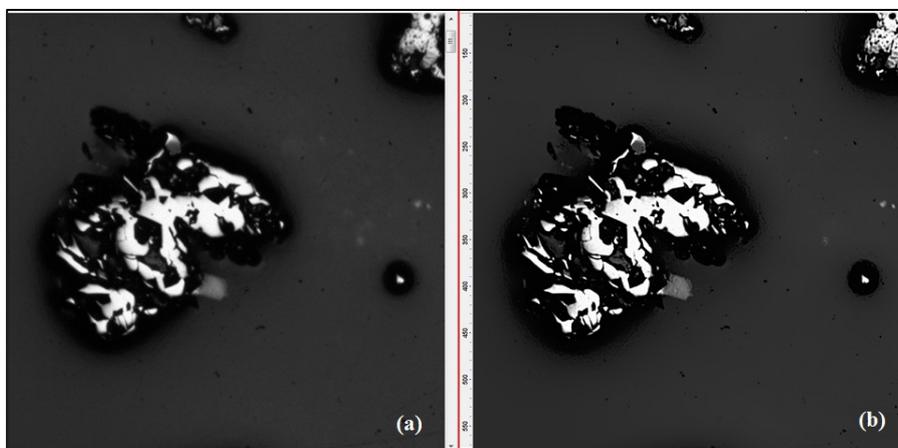


FIGURA 5.18 – Aplicação do filtro sigma, aumento de 100x. (a) Imagem original; (b) imagem resultante.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Utilizou-se a técnica de delineação para realçar as bordas das partículas, pois uma das ferramentas fundamentais da rotina é a segmentação (limiarização) das bordas.

Apresenta-se na FIG. 5.19 a imagem original e a imagem resultante após a utilização da delimitação de bordas.

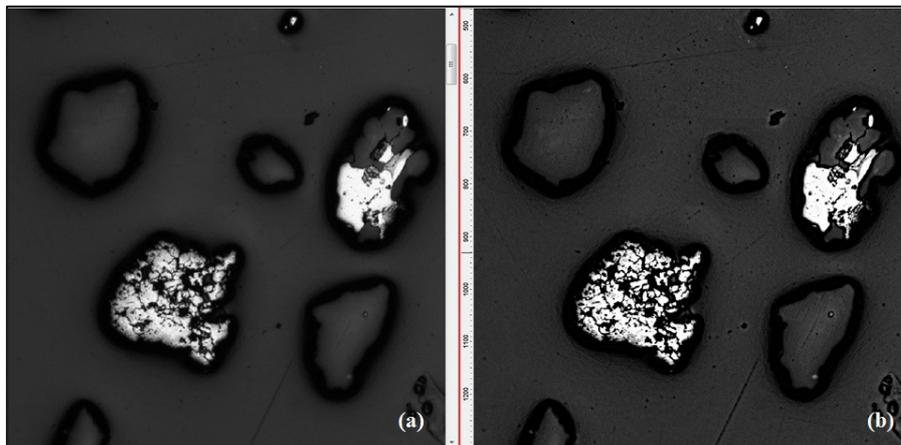


FIGURA 5.19 – Aplicação da delimitação das bordas, aumento de 100x. (a) Imagem original; (b) imagem resultante.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Uma etapa fundamental da rotina desenvolvida é a segmentação (limiarização) das bordas. A FIG. 5.20 apresenta a aplicação desta técnica, sendo que (a) é a imagem original e (b) a imagem binarizada após a segmentação das bordas.

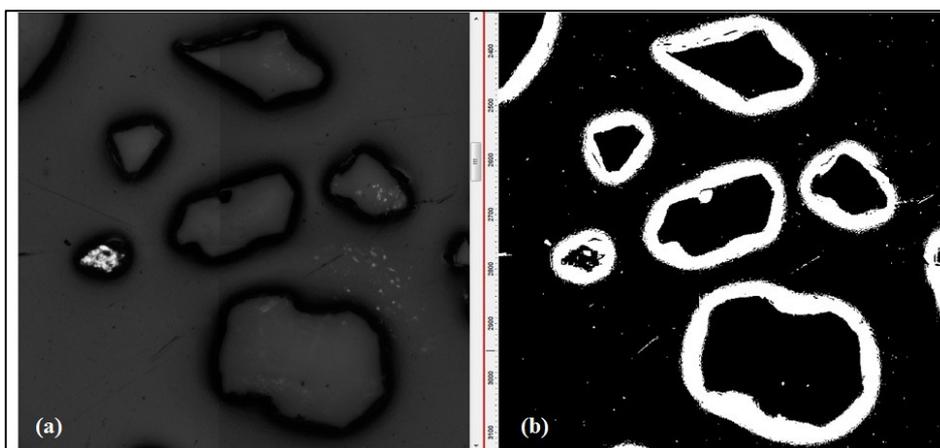


FIGURA 5.20 – Segmentação das bordas, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A segmentação do quartzo é outra etapa fundamental no processamento da imagem, a FIG. 5.21 apresenta a aplicação desta técnica.

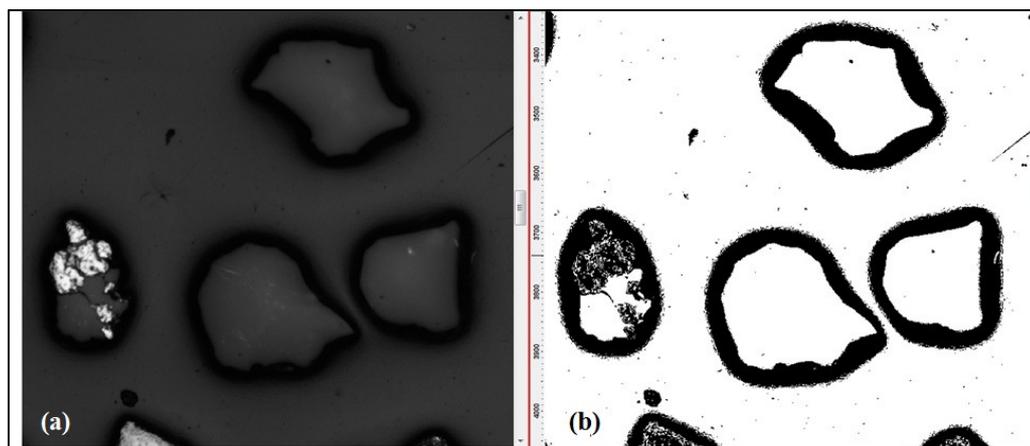


FIGURA 5.21 – Segmentação do quartzo, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Observa-se na FIG. 5.21 que o quartzo e o fundo da imagem (resina) possuem a mesma intensidade de cor, fazendo com que essas duas partes fiquem brancas na imagem binarizada. Esse problema foi relatado e descrito por Gomes (2007) e em depoimentos de profissionais que já trabalharam com o assunto. Este fato foi contemplado no início do trabalho como possível fonte de dificuldade no desenvolvimento das etapas de processamento.

Com a execução da técnica Scrap, foi possível retirar o fundo (resina) da imagem binarizada, restando somente o quartzo livre e misto na imagem resultante que será utilizada para as próximas etapas (FIG. 5.22).

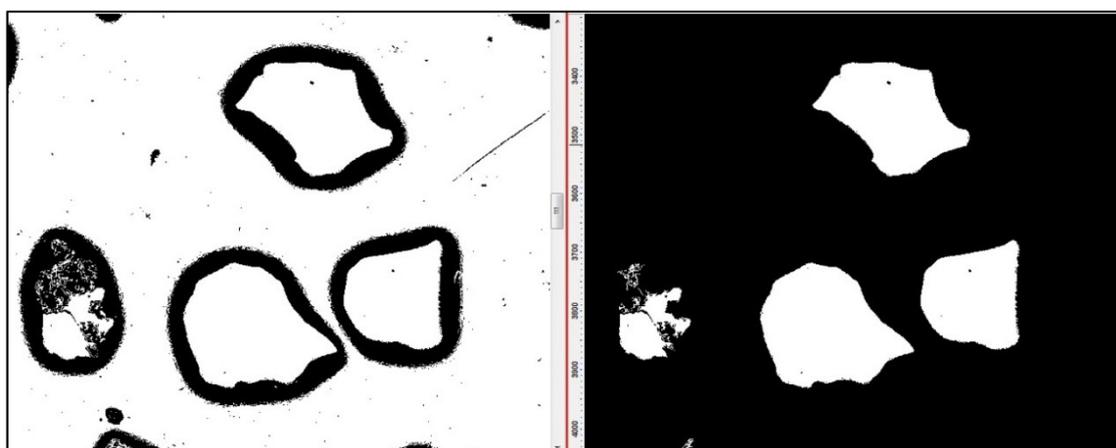


FIGURA 5.22 – Aplicação da técnica Scrap para a retirada do fundo.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Após a aplicação de algumas técnicas de pós-processamento como Erosão, Scrap e Dilatação, a FIG. 5.23 apresenta uma imagem mosaico binarizada com o quartzo identificado.

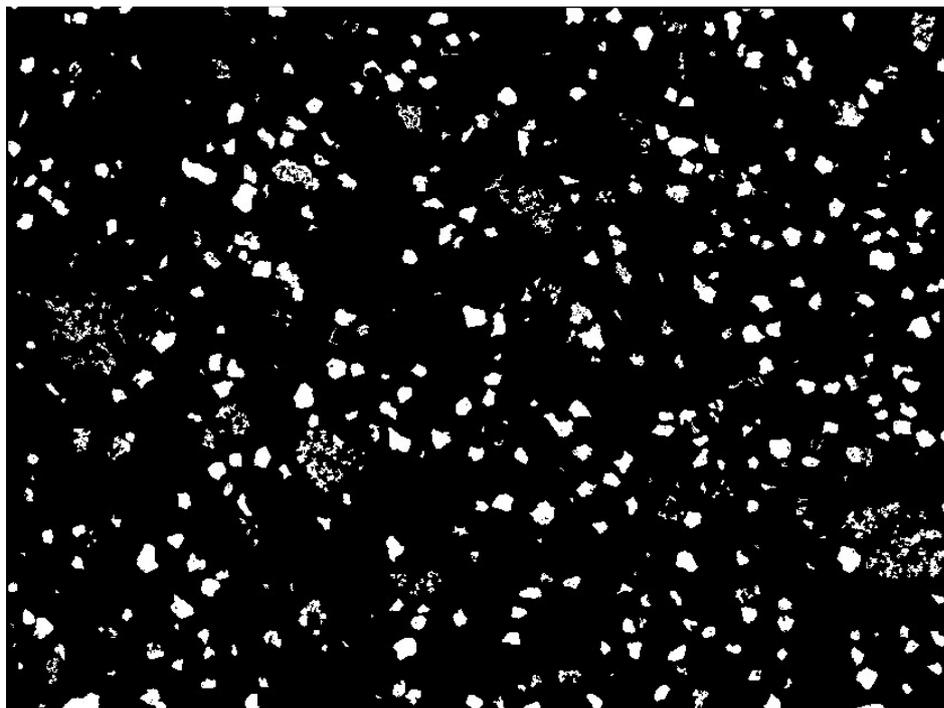


FIGURA 5.23 – Imagem processada do mosaico 12x12 com a identificação do quartzo.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Após a execução da função no software denominada Mark Regions foi possível retirar da imagem o quartzo misto, resultando em uma imagem com somente o quartzo livre, FIG. 5.24. Essa imagem servirá como base na etapa de extração de atributos para a contagem do número de partículas livres de quartzo.

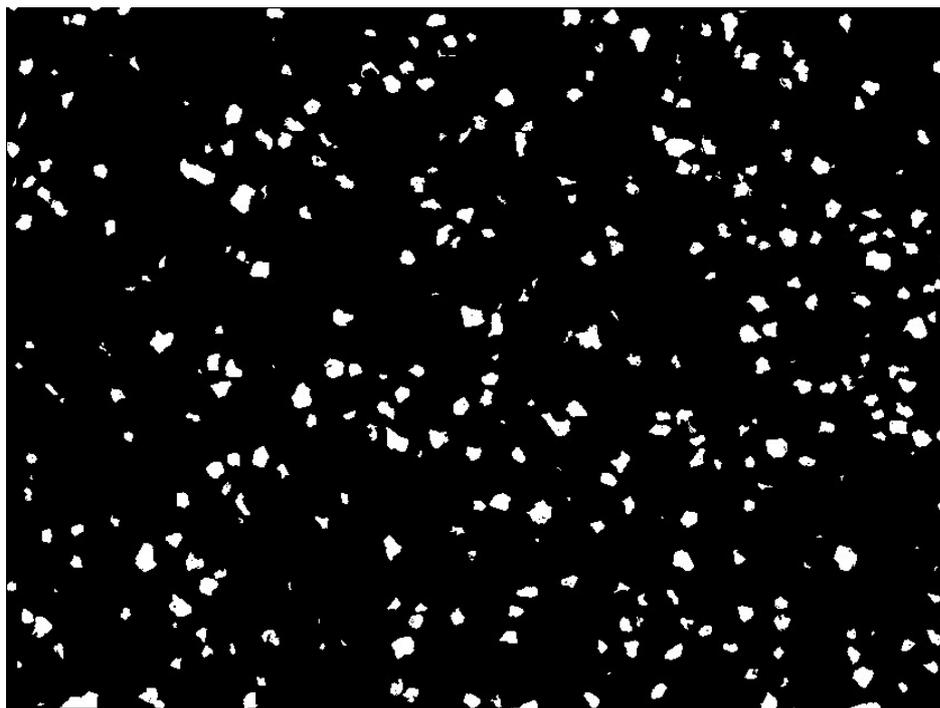


FIGURA 5.24 – Imagem mosaico 12x12 com as partículas de quartzo livre.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Com a aplicação novamente da função Mark Regions do software, foi possível separar, em imagens distintas, o quartzo misto e o mineral-minério misto (entende-se como mineral-minério sendo os óxidos e hidróxidos de ferro). Através dessas imagens executou-se a função Combine do software resultando em uma imagem única com as partículas mistas (FIG. 5.25).



FIGURA 5.25 – Imagem mosaico 12x12 das partículas mistas.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Na etapa de extração de atributos, foi criado no software um arquivo de propriedades de medição automática denominada “Grau de Liberação.zma”, que informa automaticamente a área em pixels do quartzo e do mineral-minério e o número de partículas da imagem. Este arquivo possui também uma função que elimina as partículas que tocam as bordas da imagem.

Na FIG. 5.26 pode-se visualizar um exemplo de identificação e contagem das partículas mistas realizada pelo software, e na FIG. 5.27 a identificação e contagem das partículas livres de quartzo.

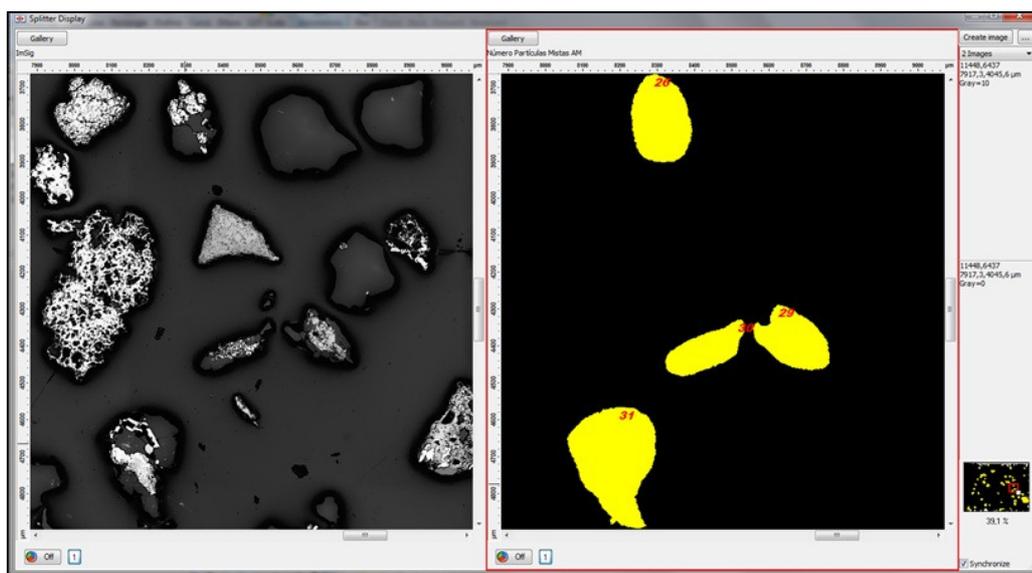


FIGURA 5.26 – Imagem com a identificação e contagem de partículas mistas.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

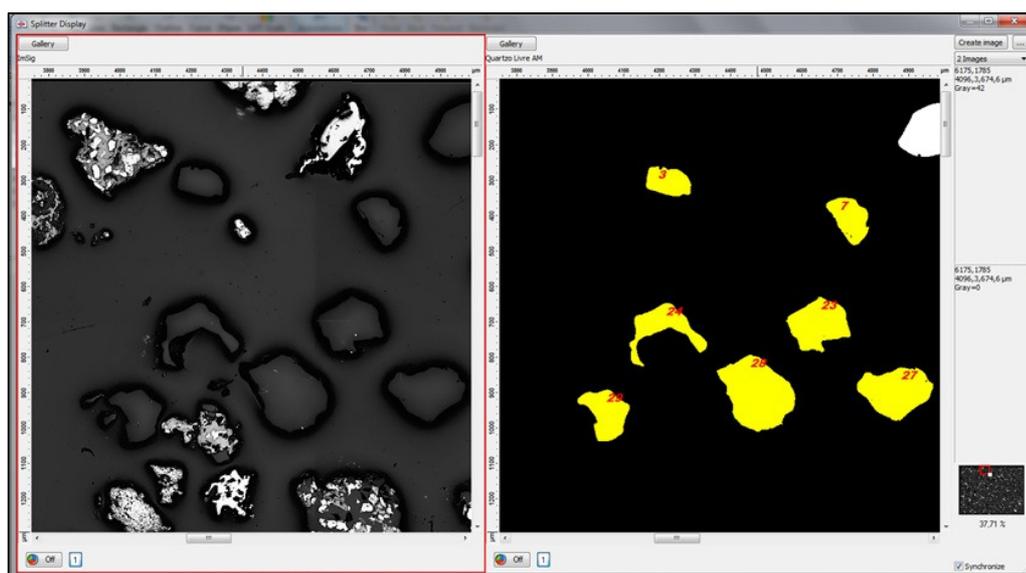


FIGURA 5.27 – Imagem com a identificação e contagem de partículas livres de quartzo.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Finalmente, na última etapa da rotina, são utilizadas técnicas de Fill, Clean e Erode para gerar uma imagem com todas as partículas. Com isso, é possível determinar o número de partículas analisadas na imagem que garantam a contagem mínima de 500 partículas determinada pelo método de Gaudin.

A TAB. 5.4 apresenta o número de partículas analisadas pelo software de cada amostra.

TABELA 5.4

Número de partículas analisadas pelo software de cada amostra.

Amostra	Número de partículas
1	1057
2	524
3	763
4	852
5	1301
6	1142
7	1179
8	678
9	1410
10	783
11	1140
12	908

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Ao final da rotina o software grava automaticamente no Hard Disk do computador planilhas eletrônicas com as informações de saída da etapa de extração de atributos. Na configuração da rotina do software é possível especificar o caminho onde essas planilhas serão gravadas.

É importante comentar que a rotina desenvolvida é fortemente dependente das condições das imagens digitalizadas e das condições de preparação das seções polidas. Qualquer alteração na luz ambiente, nas parametrizações iniciais de aquisição das imagens, tipos de filtros utilizados no microscópio, câmeras digitais utilizadas e espaçamento entre as partículas, influenciam fortemente nos resultados finais do grau de liberação. **É necessário ter um ambiente controlado para que as imagens mantenham o mesmo padrão de intensidade e perfil de histograma.**

Em função da influência de alguns destes fatores foi desenvolvida duas rotinas automáticas, com as mesmas 41 etapas de processamento, apenas diferenciando no limiar de intensidade de uma das segmentações utilizadas no processamento, passo 6 da rotina.

Para a amostra 3 foi criada a rotina denominada “GL_25;25-110;25.zscript” e para as 11 amostras restantes do trabalho foi criada a rotina denominada “GL_25;25-120;25.zscript”.

5.5.2 Ganhos de exatidão

Após o processamento das 12 imagens digitalizadas do trabalho foi possível mensurar os ganhos de exatidão da técnica. Pode-se afirmar que o grau de liberação determinado pelo software automático ficou próximo aos valores de referência, como pode ser observado no boxplot apresentado na FIG. 5.28 e no gráfico sequencial apresentado na FIG. 5.29.

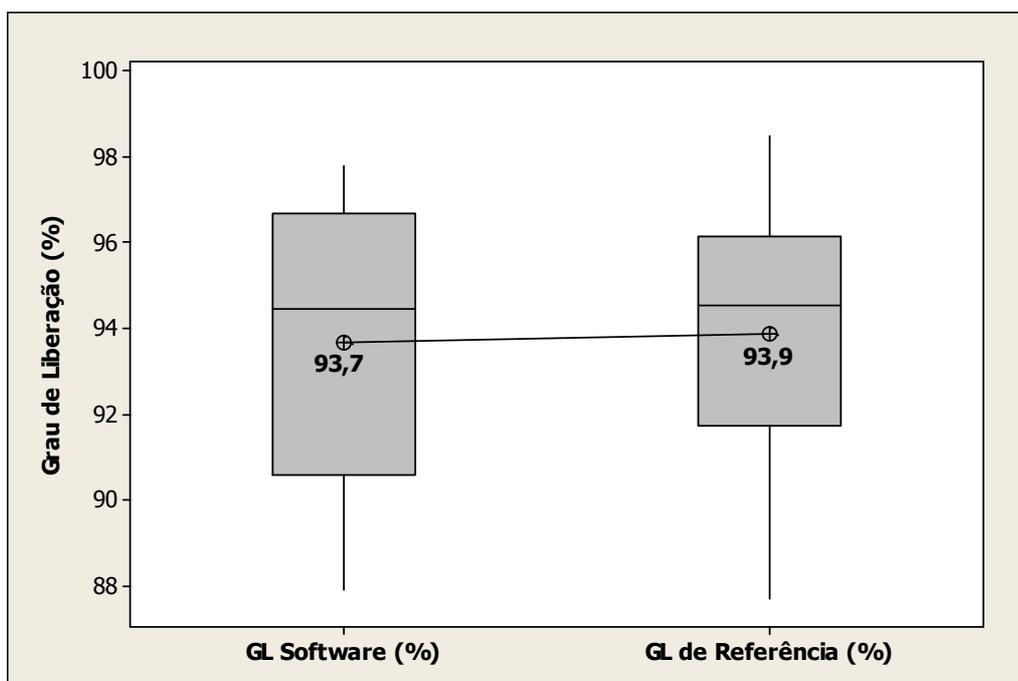


FIGURA 5.28 – Boxplot comparando a média dos resultados pelo software perante aos valores de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

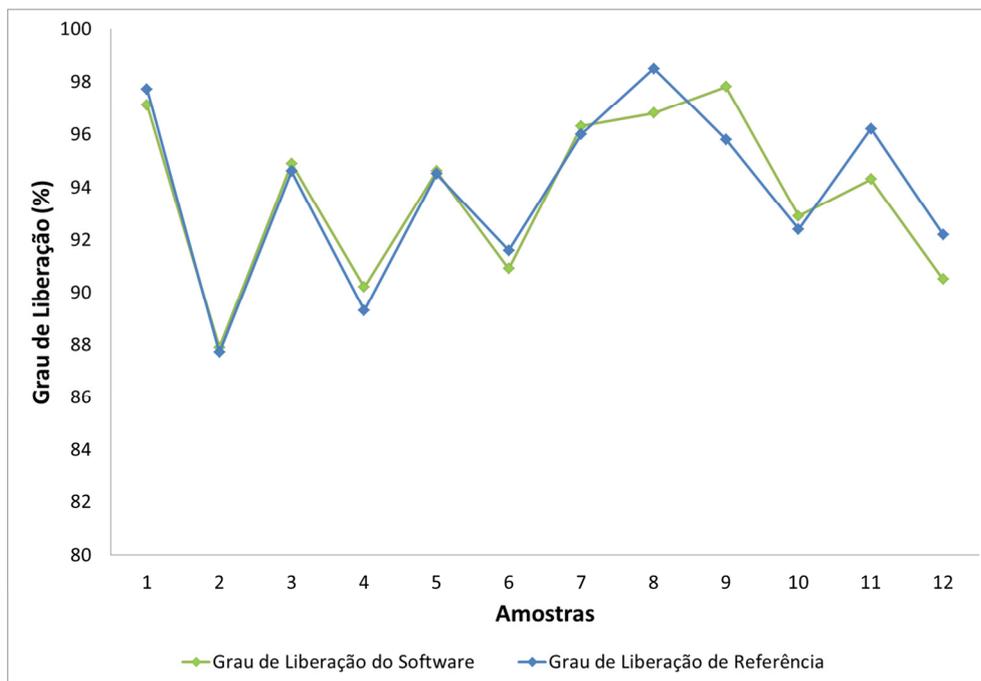


FIGURA 5.29 – Gráfico sequencial do grau de liberação determinado pelo software e valores de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A FIG. 5.30 apresenta a correlação entre grau de liberação do software *versus* o grau de liberação de referência. A linha azul é a reta 1:1 e a linha preta tracejada se refere à regressão linear cujo R^2 de 88% comprova a elevada correlação linear entre os resultados.

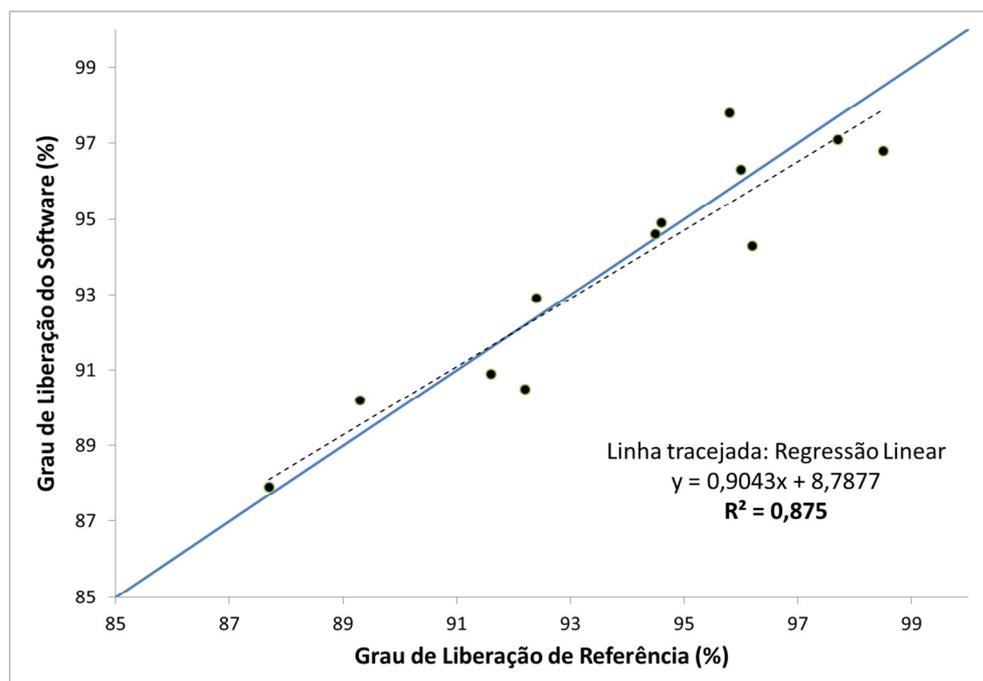


FIGURA 5.30 – Correlação entre o grau de liberação do software e o grau de liberação de referência.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

De forma a comprovar estatisticamente a exatidão dos resultados foi realizado um teste de hipótese no Minitab avaliando as seguintes alternativas:

$$H_0 : \mu_{\text{grau de liberação do software}} = \mu_{\text{grau de liberação de referência}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{grau de liberação do software}} \neq \mu_{\text{grau de liberação de referência}}$$

Resultado:

Paired T-Test and CI: GL Software (%); GL de Referência (%)

	N	Mean	StDev	SE Mean
GL Software (%)	12	93,683	3,190	0,921
GL de Referência (%)	12	93,875	3,300	0,953
Difference	12	-0,192	1,171	0,338

95% CI for mean difference: (-0,936; 0,552)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0,57 **P-Value = 0,582**

Como o p-valor do teste de hipótese resultou em um valor maior que 0,05, aceita-se a hipótese H_0 podendo afirmar que a diferença entre as médias do grau liberação dos dois dados amostrais é devido a variação natural do processo, ou seja, não há uma

diferença estatisticamente significativa entre o grau de liberação determinado pelo software e o grau de liberação de referência.

5.5.3 Ganhos de precisão

Foi possível mensurar ganhos de precisão comparando a variabilidade dos dados do grau de liberação determinados pelo software *versus* o método utilizado atualmente na Samarco. Com o intuito de aumentar o número de amostras e obter resultados mais representativos da variabilidade do método atual da Samarco, foram contempladas as 48 amostras analisadas pelas laboratoristas no teste de R&R como sendo os resultados de rotina. Para os resultados do software foram processadas quatro vezes cada uma das 12 amostras para chegar aos 48 resultados finais. A FIG 5.31 apresenta os histogramas e desvios padrão do grau de liberação do software e do grau de liberação de rotina.

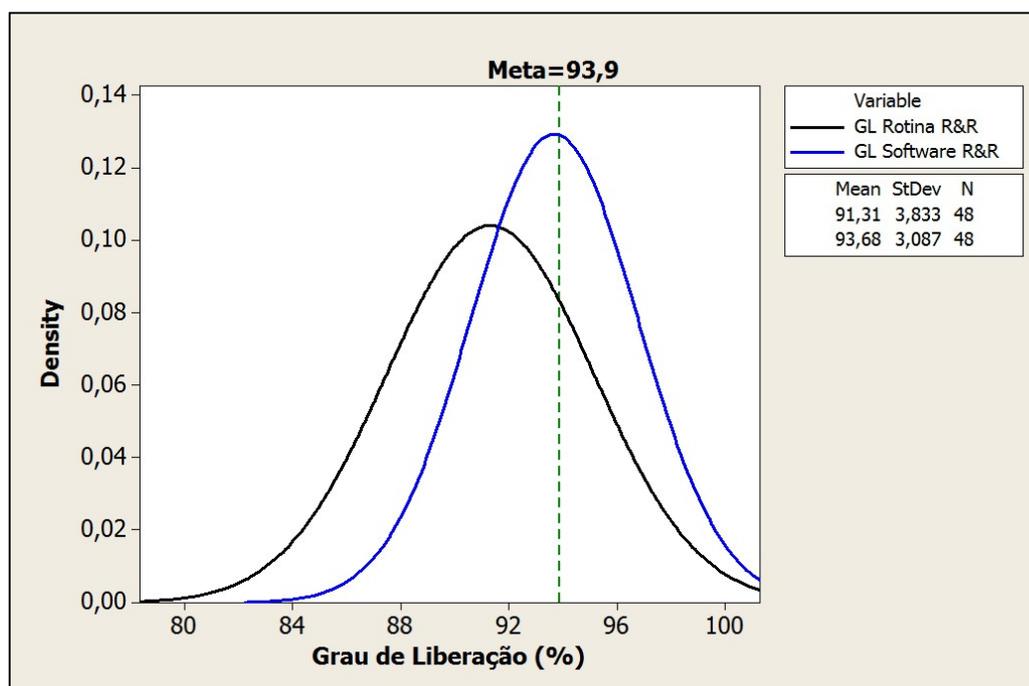


FIGURA 5.31 – Histogramas e desvios padrão dos resultados do software e de rotina.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

Observa-se no histograma que a variabilidade dos dados do software (curva azul) é menor do que os dados de rotina (curva preta). O desvio padrão do grau de liberação determinado pelo software é de 3,01 e o desvio padrão para o grau de liberação

calculado pelo método atual da Samarco é de 3,83. Esses valores comprovam o aumento em precisão na determinação do grau de liberação utilizando as técnicas de processamento e análise de imagens.

Outra forma de comprovar os ganhos em variabilidade foi através da execução do teste de R&R com os dados obtidos pelo software, os mesmos dados utilizados para a construção do histograma da FIG. 5.31. Observa-se que as contribuições da repetibilidade e da reprodutibilidade na variação total são nulas, restando apenas a contribuição do processo (part-to-part) (FIG. 5.32).

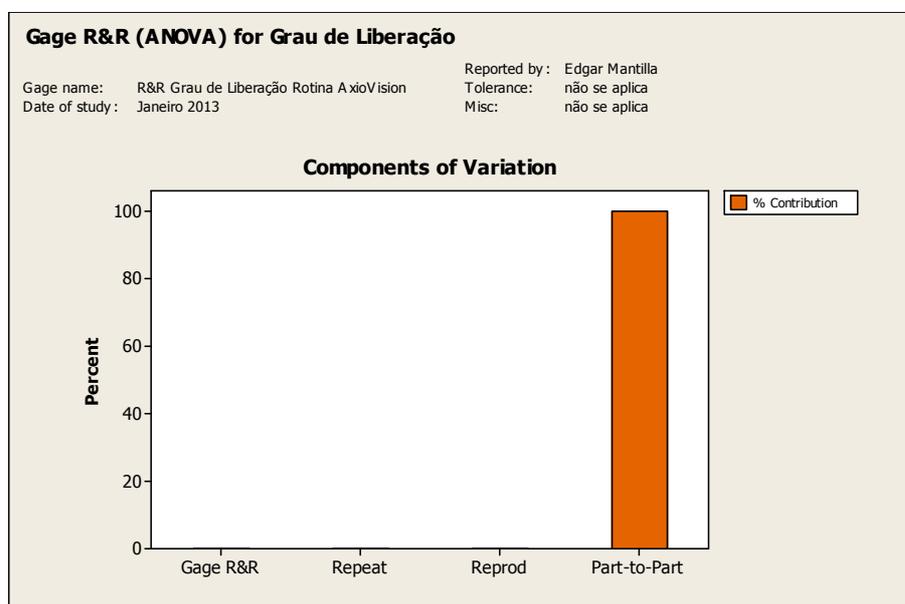


FIGURA 5.32 – Resultado gráfico do teste de R&R.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

A seguir apresenta-se os resultados do teste R&R do Minitab.

Gage R&R Study - ANOVA Method

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,00000	0,00
<u>Repeatability</u>	0,00000	<u>0,00</u>
<u>Reproducibility</u>	0,00000	<u>0,00</u>
Operador	0,00000	0,00
Operador*Amostra	0,00000	0,00
<u>Part-To-Part</u>	8,16788	<u>100,00</u>
Total Variation	8,16788	100,00

Como era esperado na aplicação da rotina de processamento e análise automática de grau de liberação, não há contribuição na variação total por parte dos operadores, pois existe apenas o software executando as medições. Baseado na EQ. (3.3) apresentada na seção 3.4, os percentuais de contribuições das variações do sistema de medição e do processo produtivo na variação total são indicados na EQ (5.2):

$$\sigma_{total}^2 = 0\% + 0\% + 100\% \quad (5.2)$$

5.5.4 Ganhos com tempo das análises

A FIG. 5.33 apresenta a comparação dos tempos médios das análises realizadas pelas laboradoras da Samarco *versus* o tempo médio das análises realizadas pelo software. Vale salientar que os tempos medidos nas análises do software são dependentes das configurações do computador. Para esses tempos considerou-se uma máquina com 5GB de RAM, sistema operacional de 32 Bits Windows 7 e processador Intel Core 2 Duo E8400 com 3 GHz.

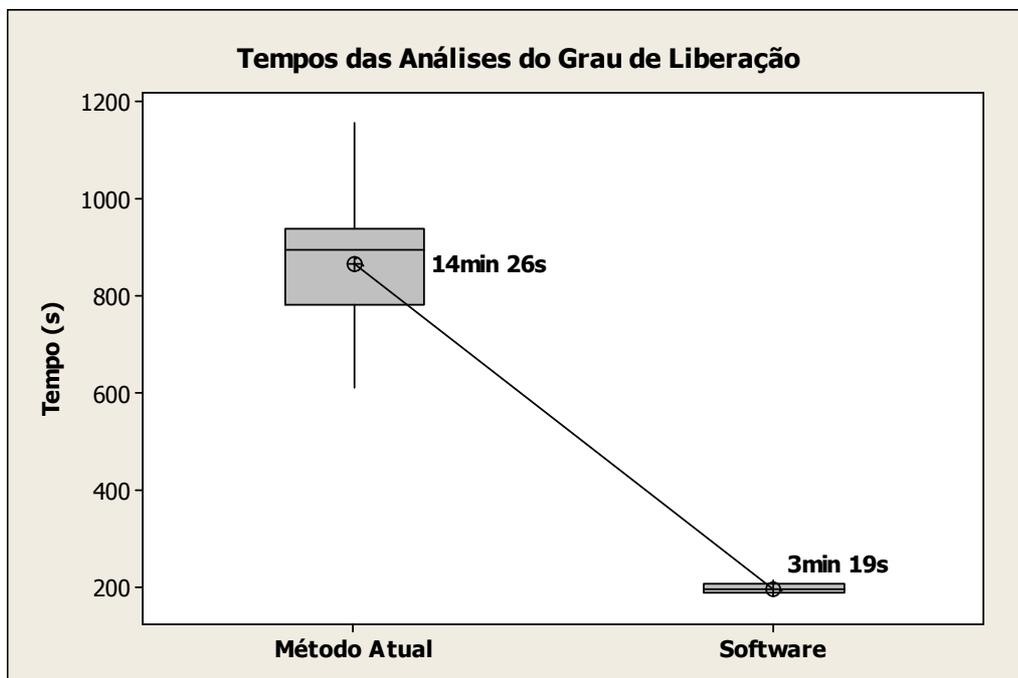


FIGURA 5.33 – Boxplot com o tempo médio das análises do software e do método atual.

Fonte: Samarco Mineração S.A.

5.5.5 Resumo dos ganhos

Na TAB 5.5 é apresentado o resumo dos ganhos com a aplicação das rotinas automáticas de cálculo do grau de liberação mensuradas através dos indicadores.

TABELA 5.5

Resumo dos ganhos com aplicação da rotina automática.

	Método Atual	Software	Ganhos relativos
Erro absoluto médio (comparação com os valores de referência)	1,1	0,2	82%
Desvio Padrão	3,8	3,0	21%
Tempo de análise	14min 26s	3min 19s	77%
R ² da regressão linear (representado a correlação dos dados com os valores de referência)	79%	88%	11%

Fonte: Samarco Mineração S.A.

6 CONCLUSÕES

Inicialmente foi diagnosticado o método atualmente utilizado pela Samarco, que consiste na utilização de um microscópio ótico com o método de contagem tradicional de Gaudin. Comparando os resultados do método atual com os valores do grau de liberação de referência, foi possível identificar uma boa correlação entre os dados, representado pelo R^2 de 79% da regressão linear. A média dos dois dados amostrais também informou uma exatidão aceitável do método atualmente utilizado pela Samarco, com um erro absoluto de apenas 1,1. Através de um teste de hipótese, foi possível concluir que não há uma diferença estatisticamente significativa entre o grau de liberação do método atual e o grau de liberação de referência.

Com a execução do teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade foi possível identificar pontos de melhoria na metodologia atualmente utilizada pela Samarco. No teste de R&R mensurou-se que a capacidade de uma laboratorista em repetir a mesma medição (repetibilidade) tem uma contribuição de 9,6% na variação total das análises. Já a capacidade de diferentes laboratoristas em realizar a mesma medição (reprodutibilidade) contribui em 16,5% na variação total das análises.

Perante esses levantamentos, a rotina automática desenvolvida no software de processamento e análise de imagens contribuiu para aumentar a precisão do método através da eliminação da contribuição da repetibilidade e reprodutibilidade na variação total das análises. Como evidência da eficácia da aplicação das técnicas de processamento e análise de imagens, foram avaliados quatro indicadores de desempenho e ganhos obtidos pela aplicação da rotina automática. São eles o erro absoluto médio de cada método de cálculo comparado ao grau de liberação de referência, o desvio padrão das análises, o tempo médio de análise e a correlação dos dados perante os valores de referência.

Obteve-se uma redução de 82% do erro absoluto médio das análises, passando de 1,1 para 0,2. A variabilidade reduziu em 21% representada pelo indicador desvio padrão, passando de 3,8 para 3,0. O tempo médio das análises reduziu em 77% passando de 14min 26s para 3min 19s, e a correlação dos dados comparados aos valores de grau de liberação de referência aumentou em 11%, representado pelo R^2 das equações lineares que aumentaram de 79% para 88%.

Finalmente desde que se tenha um ambiente controlado e se mantenham as mesmas condições/parametrizações de aquisição das imagens, bem como as condições de preparação das seções polidas sejam as mesmas, têm-se ganhos significativos na aplicação das técnicas de processamento e análise de imagens digitais através de uma rotina automática para o cálculo de grau de liberação de quartzo da Samarco Mineração S.A.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a complementação desse estudo, recomenda-se para trabalhos futuros:

- ▶ estudar outros tipos de técnicas de segmentação que garantam uma adaptabilidade da rotina automática perante a diferentes imagens digitais.
- ▶ executar mais testes com amostras no software, em torno de 1000, para a validação e garantia de resultados aplicáveis industrialmente.
- ▶ estudar as condições de implementação da rotina automática no laboratório de mineralogia da Samarco, ou seja, projetar condições de ambiente controláveis que garantam uma uniformidade das imagens adquiridas pelo microscópio ótico.
- ▶ estudar a aplicação das técnicas de análises de imagens em amostras sem embutimento em seção polida, ou seja, diretamente em fotos digitalizadas do minério de ferro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, A. J. C. *Processamento digital de imagem*. Notas de aula: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. [Lisboa], 2003. Disponível em: <www.deetc.isel.ipl.pt/comunicacoesep/disciplinas/pdi/cap5.ppt#380,4, Equalização de histograma>. Acessado em: 19 maio 2011.

ANDREWS, J. R.; MIKA, T. Comminution of heterogeneous material: development of a model for liberation phenomena. In: PROC. INT. MINERAL CONGRESS, 11., 1975, Calgary. p. 59–88 *apud* STAMBOLIADIS, E. T. The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern. *Minerals Engineering*, Chania, v. 21, 3rd ed., p. 213-223, Nov. 2007.

BARBERY, G. Random sets and integral geometry in comminution and liberation of minerals. *Minerals*. In: SME-AIME ANNUAL MEETING, 1985, New York: p. 96-102.

BARBOZA, J. L. L. *Processamento de imagens aplicado à monitoração de processos*. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências e Informática) - Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. USB Flash Drive.

BRANDÃO, P. R. G. *et al.* Caracterização mineralógica e tecnológica. In: VALADÃO, G. E. S. (Org.); ARAUJO, A. C. (Org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 3, p. 27-60.

BRANDÃO, P. R. G. *MIA4-Drx10-1b.pdf*. Notas de aula: disciplina do programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica, materiais e de minas, tema: métodos de instrumentação e análise. Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais. [Belo Horizonte], 2010. USB Flash Drive. Adobe Reader.

DAVIDSON, M. W.; ABRAMOWITZ, M. *Optical microscopy*. Encyclopedia of imaging science and technology, v. 2, p. 1106-1141, 2002 *apud* ROSA, M. *Segmentação de grãos de hematita em amostras de minério de ferro por análise de imagens de luz polarizada*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de

Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

DELBEM, I. D. *Processamento e análise digital de imagens aplicados aos estudos de liberação mineral*. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FRICK, M. A. D. *Caracterização de minério de ferro por visão computacional*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. London: McGraw-Hill, 1939 *apud* WILLS, B. A. *Wills' Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 444 p.

GOLDENSTEIN, H. Apostila da disciplina de Caracterização de Materiais. Escola Politécnica - USP, São Paulo, 2007. Disponível em:<http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_6_Microscopia_otica.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2007 *apud* ROSA, M. Segmentação de grãos de hematita em amostras de minério de ferro por análise de imagens de luz polarizada. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

GOMES, O. F. M. *Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios*. 2007. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. USB Flash Drive.

GOMES, O. F. M. *Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais*. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. USB Flash Drive.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002 *apud* IGLESIAS, J. C. A. *Uma metodologia para*

caracterização de sinter de minério de ferro: microscopia digital e análise de imagens. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. USB Flash Drive.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002. Disponível em: <http://www.imageprocessingplace.com/downloads_V3/dip2e_downloads/sample_book_material/Chapter02.pdf>. Acesso em: 14 out. 2011.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Processamento de imagens digitais*. São Paulo: Editora Blücher, 2000. 509 p. Título original: *Digital image processing apud* BARBOZA, J. L. L. *Processamento de imagens aplicado à monitoração de processos*. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências e Informática) - Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. USB Flash Drive.

HENRIQUES, A. B. *Caracterização mineralógica e propriedades eletrocinéticas de hematitas do Quadrilátero Ferrífero*. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Mineral) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <www.pos.demet.ufmg.br/hpcpgem/diss_detalhes.asp?aluno=1373>. Acesso em: 5 nov. 2010.

IGLESIAS, J. C. A. et al. Caracterização de sinter por microscopia ótica digital e análise de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. 10., 2009, Ouro Preto. *Anais*. Ouro Preto: [s. n.], 2009. ISSN: 2176-3135. CD-ROM.

IGLESIAS, J. C. A. *Uma metodologia para caracterização de sinter de minério de ferro: microscopia digital e análise de imagens*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. USB Flash Drive.

KING, R. P. A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding. *Int. J. Min. Process*, [S.l.], v. 6, p. 207–220, 1979 *apud* STAMBOLIADIS, E. T. The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern. *Minerals Engineering*, Chania, v. 21, 3rd ed., p. 213-223, Nov. 2007.

KING, R. P.; SCHENEIDER, C. L. Mineral liberation and continuous milling circuits. In: PROCEEDINGS INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 18., 1993. [S. l. : s.n.]. p. 203-211 *apud* PETRUK, W. *Applied mineralogy in the mining industry*. Ottawa: Elsevier, 2000. 268 p.

KING, R. P.; SCHENEIDER, C. L. Stereological correction of linear grade distributions for mineral liberation. *Powder Technology*, [S. l.], v. 98, p. 21-37, Jan. 1998.

LESSA, A. M.; GOMES, O. F. M.; FERREIRA, H. O.; PACIORNIK, S.; D'ABREU, J. C. Classificação automática de hematita especular e hematita porosa em “pellet feed” por análise digital de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO. 8., 2007, Salvador. *Anais*. Salvador: [s. n.], 2007. CD-ROM.

MAXIMO, A.; ALVARENGA, B. *Curso de física-volume 2*. São Paulo: Scipione, 2000. 281 p. *apud* ROSA, M. *Segmentação de grãos de hematita em amostras de minério de ferro por análise de imagens de luz polarizada*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

NARDY, A. J. R.; MACHADO, F. B. *Mineralogia óptica: óptica cristalina*. [Rio Claro], 2002. Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/textospdf.html>. Acesso em: 25 nov. 2010.

NARDY, A. J. R.; ZANARDO, A.; GALEMBECK, T. M. B. *T2.pdf*. Notas de aula: disciplina mineralogia óptica do curso de graduação de geologia, tema: microscópio petrográfico. Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Universidade Estadual Paulista. [Rio Claro], 2010. Disponível em: <www.rc.unesp.br/igce/petrologia/nardy/T2.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2010.

NEUMANN, R.; SCHENEIDER, C. L.; ALCOVER NETO, A. Caracterização tecnológica de minérios. In: LUZ, A. B. (Ed.); SAMPAIO, J. A. (Ed.); ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). *Tratamento de minério*. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004. Cap. 3, p. 55-109.

OLIVEIRA, E. F. *Estudo da granulometria em imagens via a modelagem das frequências espaciais*. 2007. Dissertação (Mestrado em análise e seleção de materiais) – REDEMAT - Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. USB Flash Drive.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M.; ROCHA, S. D.; SALUM, A. *Flotação.pdf*. Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2004. 69 p. USB Flash Drive. Adobe Reader.

PACIORNIK, S. *Microscopia quantitativa*. [Rio de Janeiro], 2009. Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio. Disponível em: <<http://www.dema.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

PACIORNIK, S. *Processamento digital de imagens*. [Rio de Janeiro], 2011. Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio. Disponível em: <www.dema.puc-rio.br/cursos/ipdi/html/ipdi.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2011.

PACIORNIK, S.; MAURÍCIO, M. H. P. *Digital imaging*. ASM Handbook: Metallography and Microstructures. Rio de Janeiro, 2004. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dcm.puc-rio.br/cursos/ipdi/html/Digital%20Imaging.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2010.

PEREIRA, L. M. L. *Treinamento Samarco: mineralogia do minério de ferro*. [Belo Horizonte]: Open Brasil, 2010. CD-ROM.

PERES, A. E. C. *et al.* Métodos de concentração. In: VALADÃO, G. E. S. (Org.); ARAUJO, A. C. (Org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. Cap. 6, p. 105-139.

PETRUK, W. Applied mineralogy in the mining industry. 1st ed. Ottawa: Elsevier, 2000. 268 p.

QUEIROZ, L. A. et al. *Análise mineralógica aplicada ao desenvolvimento de processos e produtos de minérios de ferro*. In: SEMINÁRIO DE LABORATÓRIOS DE MINÉRIO DE FERRO DA CVRD, 3., 2003, São Luís.

ROCHA, J. M. P. *Definição da Tipologia e Caracterização Mineralógica e Microestrutural dos Itabiritos Anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. - Minas Gerais*. 2008. Tese (Doutorado em Tecnologia Mineral) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. USB Flash Drive.

RODENACKER, K.; BENGTTSSON, E. *A feature set for cytometry on digitized microscopic images*. Analytical Cellular Pathology, v. 25, p. 1-36, 2002 *apud* ROSA, M. *Segmentação de grãos de hematita em amostras de minério de ferro por análise de imagens de luz polarizada*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

ROSA, M. *Segmentação de grãos de hematita em amostras de minério de ferro por análise de imagens de luz polarizada*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

SHAPIRO, L.; STOCKMAN, G. *Computer vision*. New Jersey: Prentice Hall, 2001 *apud* FRICK, M. A. D. *Caracterização de minério de ferro por visão computacional*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. USB Flash Drive.

SILVA, A. T. Tratamento de minérios. Belo Horizonte: Edições Engenharia, 1973. v. 4 *apud* VALADÃO, G. E. S. (Org.); ARAUJO, A. C. (Org.). *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 234 p.

SUTHERLAND, D.; GOTTILEB, P. Application of automated quantitative mineralogy in mineral processing. *Minerals Engineering*, [s. L.], v. 4, p. 753-762, 1991 *apud* GOMES, O. F. M. *Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios*. 2007. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. USB Flash Drive.

VIEIRA, P. R. M.; PACIORNIK, S. Uncertainty evaluation of metallographic measurements by image analysis and thermodynamic modeling. *Materials Characterization*, [S. I.], v. 47, p. 219-226, 2001 *apud* GOMES, O. F. M. *Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios*. 2007. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. USB Flash Drive.

WEI, X.; GAY, S. L. Liberation model using a dispersion function. *Miner. Eng.* 12 (2), [S.I.], p. 219–228, 1999 *apud* STAMBOLIADIS, E. T. The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern. *Minerals Engineering*, Chania, v. 21, 3rd ed., p. 213-223, Nov. 2007.

WERKEMA, M. C. C. *Avaliação de sistemas de medição*. 1^a Ed. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006. 116p. (Seis Sigma; v.5).

WIEGEL, R. L. Integrated size reduction-mineral liberation model. *Trans. Soc. Mining Eng.*, [S.I.], v. 260, p. 147–152, 1976 *apud* STAMBOLIADIS, E. T. The evolution of a mineral liberation model by the repetition of a simple random breakage pattern. *Minerals Engineering*, Chania, v. 21, 3rd ed., p. 213-223, Nov. 2007.

WILLS, B. A. *Wills' Mineral Processing Technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th. ed. Oxford: Elsevier, 2006. 444 p.

WINKLER, L.; THOMÉ, A. C. G. *Tratamento de Imagens: transformações (cont.)*, WINKLER & THOME I. Disponível em: <http://equipe.nce.ufrj.br/thome/p_grad/nn/transp/c3_tratam_v3b.pdf>. Acessado em: mar. 2003 *apud* BARBOZA, J. L. L. *Processamento de imagens aplicado à*

monitoração de processos. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências e Informática) - Instituto de Matemática e Núcleo de Computação Eletrônica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. USB Flash Drive.

ANEXO

ANEXO A – Sequência completa das etapas da rotina automática do software.

