

DETERMINAÇÃO DO GRAU DE LIBERAÇÃO MINERAL ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS OBTIDAS VIA MICROSCÓPIO ÓTICO¹

Edgar Rodo Mantilla²

Resumo

Este trabalho consiste na aplicação de uma rotina automática na determinação do grau de liberação do quartzo para 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. Foram mensuradas as fontes de variações do sistema de medição através de um teste de Repetibilidade & Reprodutibilidade e desenvolvidas rotinas automáticas em um software de análise de imagens. Foi possível mensurar 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, 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 da rotina automática foi possível mensurar a redução da variabilidade das análises em 21% e a diminuição do tempo médio das análises em 77%, passando de 14 min 26 s para 3 min 19 s. Evidenciando os ganhos significativos na aplicação das técnicas de 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.

DETERMINATION OF MINERAL LIBERATION THROUGH DIGITAL IMAGE PROCESSING AND ANALYSIS OBTAINED BY OPTICAL MICROSCOPE

Abstract

This work consist in the application of an automatic routine for determination of degree of liberation for 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. A Repeatability & Reproducibility test was performed and an automatic routine was developed. 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 results it was possible to reduce the analyses variability by 21% and reduce the analyses average time by 77%, from 14 min 26 s to 3 min 19 s. Showing significant gains by the application of the digital images processing and analysis techniques through an automatic routine of determination of degree of liberation in Samarco Mineração S.A.

Key words: Digital image analysis; Mineral liberation; Optical microscopy; Iron ore.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 1 a 4 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro de Processo, Departamento de Engenharia de Processo, Unidade Germano, Samarco Mineração S.A., Mariana, MG, Brasil.

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.

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.⁽¹⁾ A liberação na Samarco, 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.

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.⁽²⁾

A Equação 1 representa essa decomposição:

- variabilidade resultante do processo produtivo; e
- variabilidade inerente ao sistema de medição.

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{sistema\ de\ medição}^2 + \sigma_{processo\ produtivo}^2 \quad (1)$$

Levando-se em conta que a variabilidade do sistema de medição é constituída por duas componentes, repetibilidade e reprodutibilidade, a Equação 2 pode ser escrita como:

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

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”..⁽³⁾

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”..⁽⁴⁾

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.

Desta forma o objetivo do trabalho foi 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 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Equipamentos

Foi utilizado um microscópio ótico de luz refletida da marca Zeiss modelo Imager.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.

Foi utilizado o software AxioVision 4.8 (2009) da marca Zeiss para a criação das rotinas de análise de imagens. E para a análise das informações e testes estatísticos foi utilizado o Minitab versão 16.

2.2 Métodos

2.2.1 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. Essas amostras pertencem à análise de rotina da Samarco e foram determinadas as liberações do quartzo na fração +100# (+0,15mm) seguindo os procedimentos padrões da Samarco utilizando o método tradicional de Gaudin por contagem de grãos (mínimo 500 partículas).

Como valor de referência foi determinado novamente o grau de liberação das 12 amostras 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.

2.2.2 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 através do teste de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) no Minitab. O laboratório de mineralogia da Samarco possui duas laboratoristas e, como cada uma analisou em duplicata 12 seções polidas, ao final obtivemos 48 análises.

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

2.2.3 Processamento e análise de imagens digitais

O primeiro passo foi a digitalização das imagens das 12 amostras de referência. Uma parametrização padrão para as imagens captadas no microscópio e câmera digital da Zeiss foi necessária para uniformizar as imagens de maneira a facilitar o processamento e viabilizar a extração de atributos.

Baseado nos passos elementares da metodologia de processamento e análise digital de imagens,⁽⁵⁾ o presente trabalho seguiu as seguintes etapas: Aquisição das Imagens → Pré-Processamento → Segmentação → Pós-Processamento → Extração de Atributos.

2.2.4 Comparação de desempenho

Com o objetivo de avaliar a eficácia das rotinas automáticas desenvolvidas no software, 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 (R&R).

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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação das Fontes de Variação

De forma gráfica a Figura 1a apresenta o resultado do teste de R&R 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). Na Figura 1b apresentam-se os resultados quantitativos.

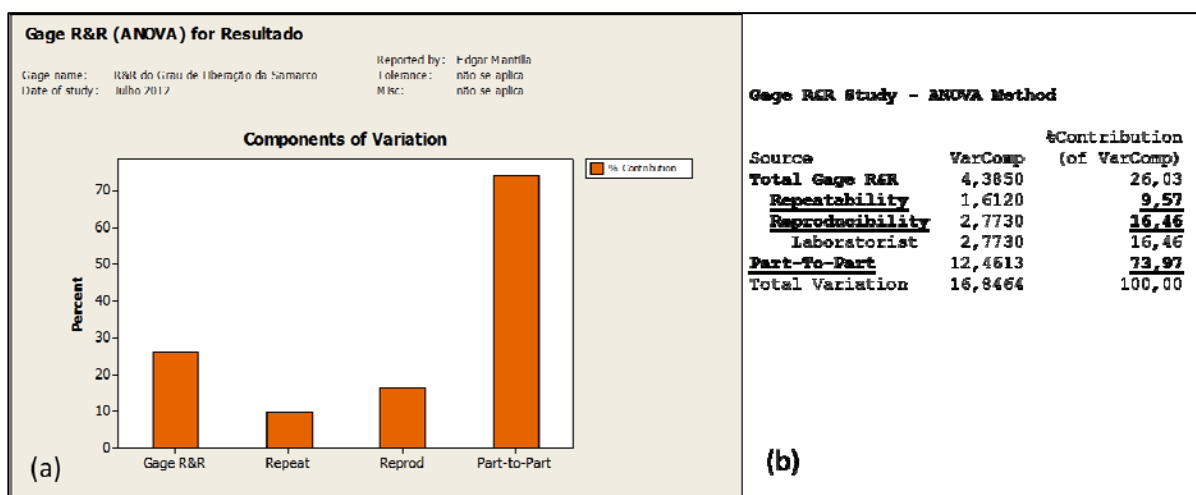


Figura 1. (a) Resultado gráfico do teste de R&R; (b) Resultado quantitativo do teste R&R no Minitab.

Baseado na Equação 2 apresentada neste trabalho, os percentuais de contribuições das variações do sistema de medição e do processo produtivo na variação total são indicados na Equação 3:

$$\sigma_{\text{total}}^2 = 9,57\% + 16,46\% + 73,97\% \quad (3)$$

Portanto, com a aplicação do software de análise automática vislumbrou-se a possibilidade de ganhos em precisão na ordem de 26,1%.

O diagrama de dispersão do comportamento das medições entre as laboratoristas, ou seja, a reprodutibilidade, é mostrada na Figura 2a. Pode-se observar que a laboratorista 2 realizou medições com valores inferiores ao da laboratorista 1. Essa diferença é confirmada no boxplot da Figura 2b, onde se mostram as médias realizadas das duas laboratoristas. Essas avaliações confirmam a subjetividade presente nas medições do grau de liberação.

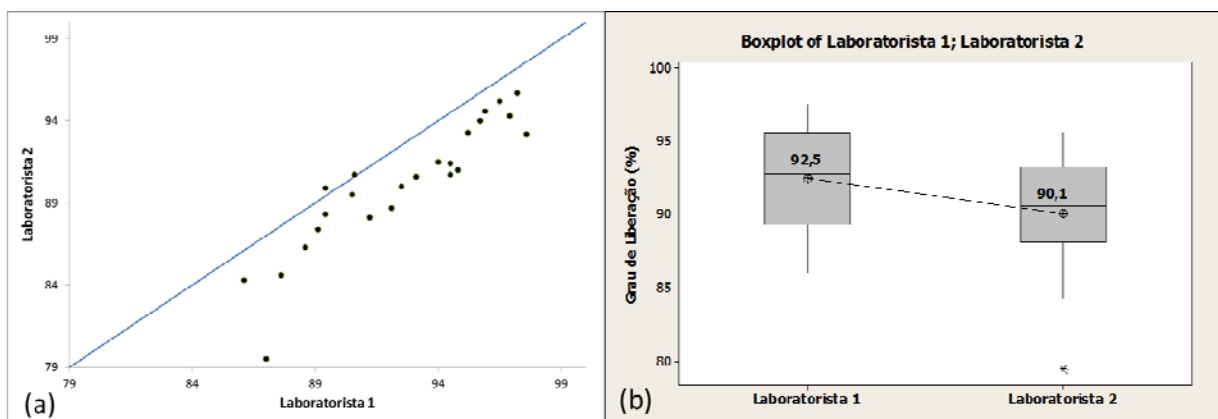


Figura 2. (a) Dispersão mostrando as medições realizadas pelas laboratoristas 1 e 2; (b) Boxplot com a média do grau de liberação das duas laboratoristas.

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:

- $H_0 : \mu_{\text{laboratorista 1}} = \mu_{\text{laboratorista 2}}; e$
- $H_1 : \mu_{\text{laboratorista 1}} \neq \mu_{\text{laboratorista 2}}$

Resultado:

Paired T-Test and CI: 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.

3.2 Processamento e Análise de Imagens Digitais

Na Figura 3, para efeito de exemplificação, observa-se uma imagem mosaico digitalizada da amostra 1 (seção polida analisada no dia 4/1/11 Usina 1).

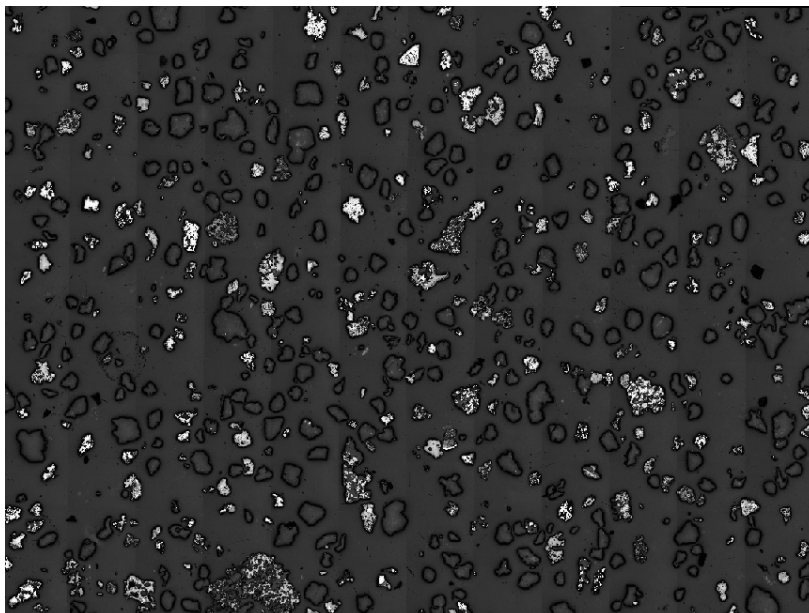


Figura 3. Imagem mosaico digitalizada da amostra 1, aumento de 100x.

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.

Resumidamente, no Quadro 1, apresentam-se as principais técnicas de processamento e análise de imagens digitais utilizadas na rotina automática do cálculo do grau de liberação.

Quadro 1. Principais técnicas de processamento e análise de imagens utilizadas na rotina automática

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

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.

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 (Figura 4).

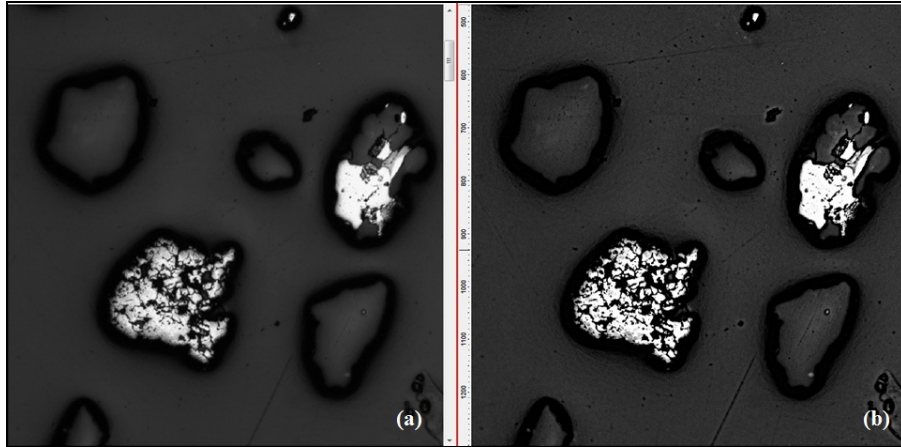


Figura 4. Aplicação da delineação das bordas, aumento de 100x. (a) Imagem original; (b) imagem resultante.

Uma etapa fundamental da rotina desenvolvida é a segmentação (limiarização) das bordas. A Figura 5 apresenta a aplicação desta técnica, sendo que (a) é a imagem original e (b) a imagem binarizada após a segmentação das bordas.

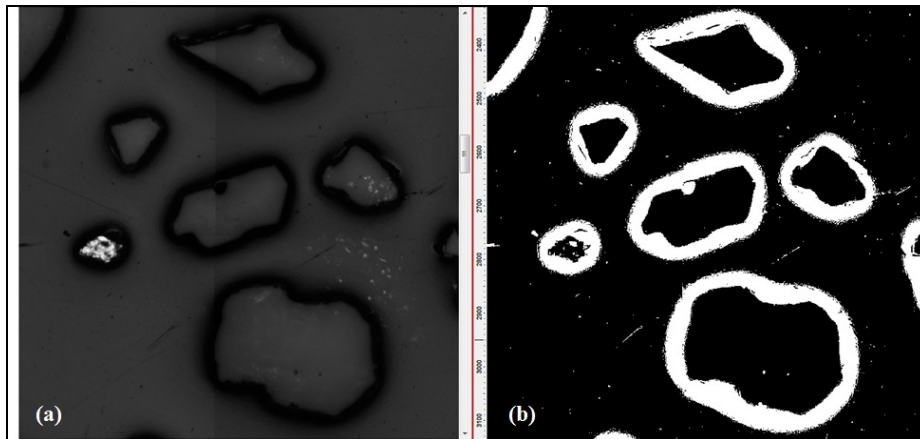


Figura 5. Segmentação das bordas, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada.

A segmentação do quartzo é outra etapa fundamental no processamento da imagem, a Figura 6 apresenta a aplicação desta técnica.

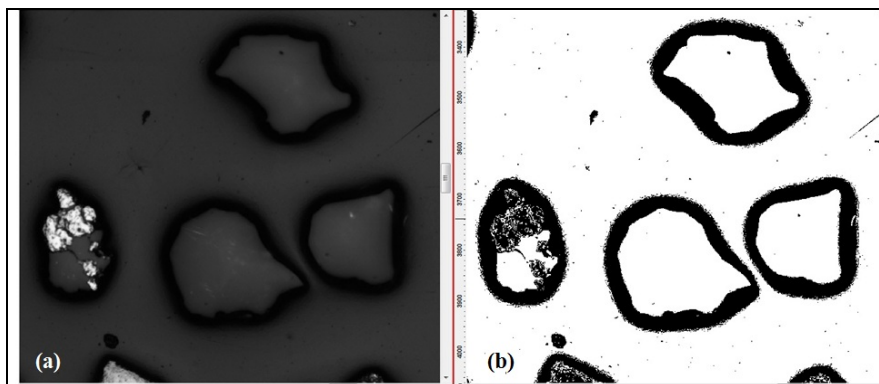


Figura 6. Segmentação do quartzo, aumento de 100x. (a) imagem original; (b) imagem binarizada.

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 (Figura 7).

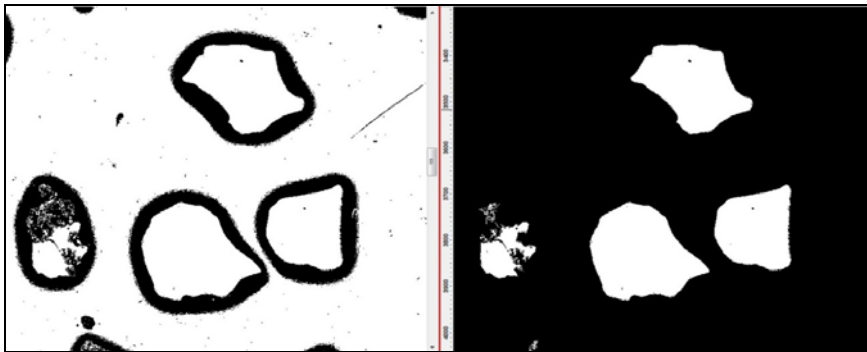


Figura 7. Aplicação da técnica Scrap para a retirada do fundo.

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 (Figura 8a). Essa imagem servirá como base na etapa de extração de atributos para a contagem do número de partículas livres de quartzo. 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 (Figura 8b).

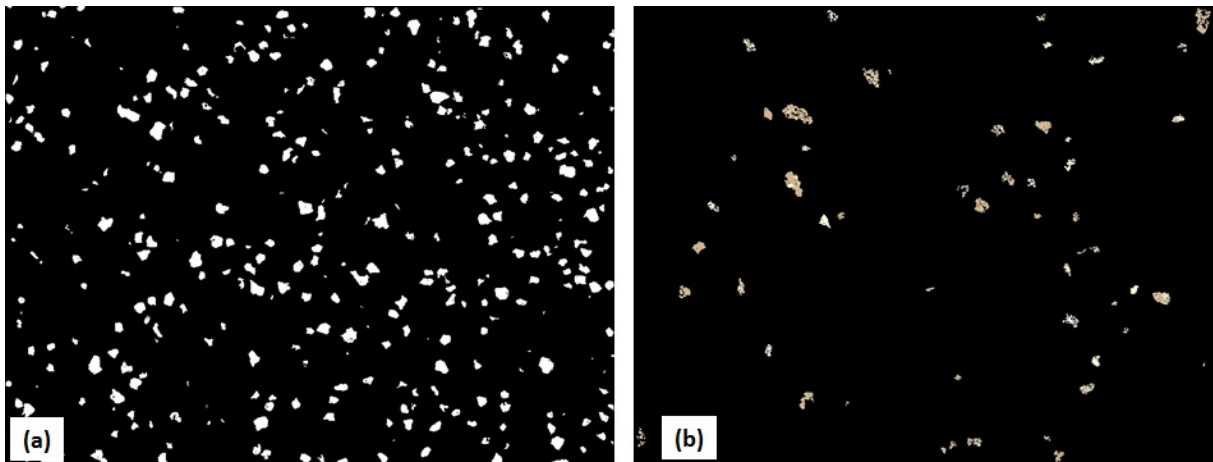


Figura 8. Imagem mosaico 12x12. (a) Partículas de quartzo livre; (b) Partículas mistas.

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 Figura 9 pode-se visualizar um exemplo de identificação e contagem das partículas mistas realizada pelo software, e na Figura 10 a identificação e contagem das partículas livres de quartzo.

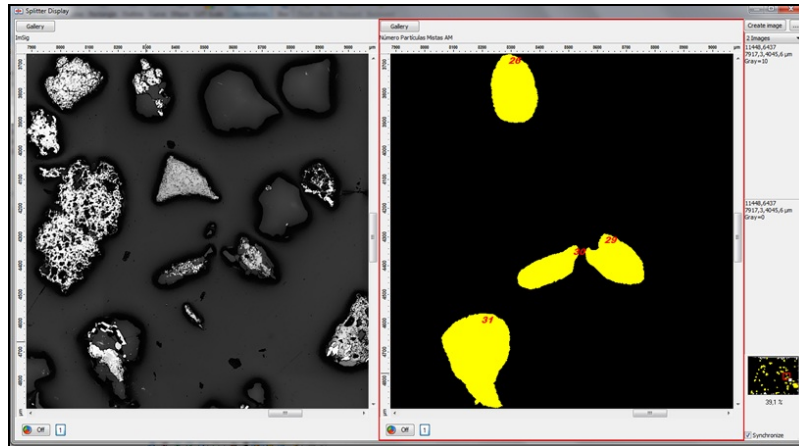


Figura 9. Imagem com a identificação e contagem de partículas mistas.

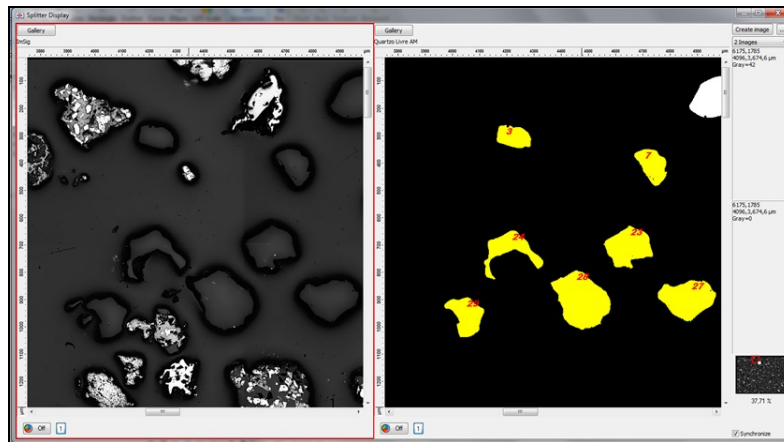


Figura 10. Imagem com a identificação e contagem de partículas livres de quartzo.

3.3 Ganhos de Exatidão

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 Figura 11a e no teste de hipótese apresentado na Figura 11b. Como o p-valor do teste de hipótese resultou em 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.

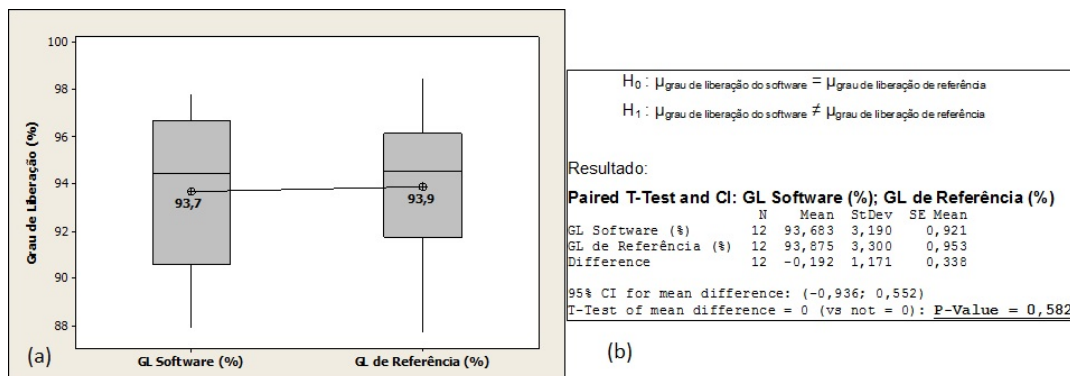


Figura 11. Comparação dos resultados do grau de liberação determinado pelo software e valores de referência. (a) Boxplot; (b) Teste de Hipótese.

A correlação entre grau de liberação do software *versus* o grau de liberação de referência foi elevada, representada pelo R^2 de 88% da regressão linear apresentada na Equação 4.

$$y = 0,9043x + 8,7877 \quad (4)$$

3.4 Ganhos de Precisão e Tempo das Análises

A Figura 12a apresenta os histogramas e desvios padrão do grau de liberação do software e do grau de liberação de rotina. Observa-se no histograma que a variabilidade dos dados do software (curva azul; desvio padrão = 3,01) é menor do que os dados de rotina (curva preta; desvio padrão = 3,83). Esses valores comprovam o aumento em precisão na determinação do grau de liberação utilizando as técnicas de análise de imagens. A Figura 12b apresenta a comparação dos tempos médios das análises realizadas pelas laboratoristas da Samarco *versus* o tempo médio das análises realizadas pelo software.

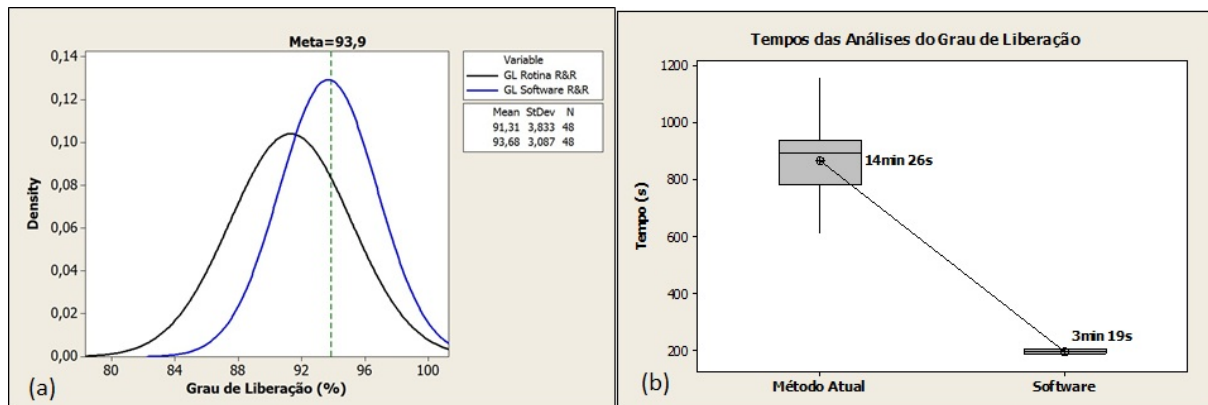


Figura 12. (a) Histogramas e desvios padrão dos resultados do software e de rotina; (b) Boxplot com o tempo médio das análises do software e do método atual.

4 CONCLUSÃO

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 a 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, desvio padrão das análises, tempo médio de análise e correlação dos dados perante aos 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.

Agradecimentos

A Deus e minha família. A Samarco e profissionais que apoiaram o desenvolvimento do trabalho, na execução dos testes, ensinamentos e suporte. Ao meu orientador Roberto Galery. Ao Itamar Delbem. A SGS Geosol pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 WERKEMA, M. C. C. *Avaliação de sistemas de medição*. 1ª Ed. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006. 116p. (Seis Sigma; v.5).
- 3 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.
- 4 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.
- 5 VIEIRA, P. R. M.; PACIORNIK, S. Uncertainty evaluation of metallographic measurements by image analysis and thermodynamic modeling. *Materials Characterization*, [S. l.], 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.