

ANÁLISE DE IMAGEM AUTOMATIZADA NO ESTUDO DA ACESSIBILIDADE DE GRÃOS DE OURO

F. R. COSTA*, D. ULIANA, G. P. NERY, C. ULSEN e H. KAHN

Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
fabrizio@lct.poli.usp.br*

Artigo submetido em novembro/2015 e aceito em dezembro/2015

DOI: 10.15628/holos.2015.3728

RESUMO

A análise de imagens automatizada tem importante papel no setor mineral principalmente pela rapidez das análises, robustez estatística e confiabilidade dos resultados. A técnica pode ser realizada por meio de imagens adquiridas em microscópio eletrônico de varredura (MEV), geralmente associada a microanálises químicas por EDS e podendo ser utilizada em diversas etapas de um empreendimento mineiro. Este estudo teve

como objetivo o estudo da acessibilidade utilizando a técnica de análise de imagens automatizada por MLA (do inglês, *Mineral Liberation Analyser*). Foi possível identificar os grãos de ouro, determinar seu tamanho, forma de ocorrência e acessibilidade diante três tipos de corpos de minério delineados em relação aos seus teores de arsênio.

PALAVRAS-CHAVE: análise quantitativa de imagens, minério de ouro e arsenopirita.

AUTOMATED IMAGE ANALYSES TO STUDY GOLD GRAIN ACCESSIBILITY

ABSTRACT

The automated image analysis has an important part in the mineral sector today, due to its fast and reliable results. The technique can be performed using images acquired in a scanning electron microscope (SEM), usually associated with chemical microanalysis by EDS and can be used at different stages of a mining project. This study aims to develop a technological

characterization of gold ores using the automated image analysis technique by MLA (*Mineral Liberation Analyser* - FEI). The objectives are to identify gold grains, determine its size/shape of occurrence and accessibility on three types of ore bodies according to its arsenic content.

KEYWORDS: automated image analysis, gold ore and arsenopyrite

1 INTRODUÇÃO

A constante busca por um empreendimento cada vez mais eficiente e otimizado, com uma produção de baixo custo aliado a um ganho financeiro maximizado é o objetivo da indústria, não só mineral, mas como toda a cadeia de produção em escala mundial.

Em unidade de beneficiamento de minérios de ouro, as instalações de processamento respondem por grande parte do gasto geral no empreendimento mineiro. Um estudo mineralógico, no tocante ao desempenho ao minério e previsibilidade do produto, promoveria uma melhor alternativa de redução desses custos.

No presente trabalho foi analisado o método de classificação dos minérios quanto a sua composição mineralógica, associações entre os sulfetos e características dos grãos de ouro. Em decorrência do aumento da produção de ouro nos últimos anos, a busca por um minério com teor dentro da estratégia de longo prazo das empresas é influenciada principalmente pelos índices de recuperação do minério na usina, associações mineralógicas e comportamento do minério perante ao processo.

As aplicações das informações mineralógicas ajudam a entender e resolver problemas durante toda a cadeia mineral, desde a pesquisa mineral até os produtos gerados no beneficiamento. Isso envolve a interpretação dos dados na exploração mineral, processamento, rejeitos, hidrometalurgia, pirometalurgia e refino. Há uma grande variedade de técnicas que podem ser aplicadas nas quais incluem microscopia eletrônica de varredura (MEV) equipada com espectrometria de energia dispersiva raios X (EDS), espectrometria de massa, espectrometria infravermelha (IV), catodoluminescência, entre outros (PETRUK, 2000).

A importância de se efetuar a conexão entre mineralogia do minério e performance na usina vem sendo proposta desde a década de 1970. Trabalhos de GRANT et al., (1979) descrevem a caracterização de partículas quanto ao tamanho e composição utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV). Posteriormente, o desenvolvimento de sistemas acoplados como QEMSCAN e o MLA formaram plataformas inovadoras para a análise de imagens com aplicações na geologia e processamento mineral. A utilização de métodos automatizados permite, além de minimizar o erro humano, trabalhar de forma contínua e aumentar o número de partículas examinadas para uma melhor condição estatística, com incomparável aumento da velocidade da análise (GOODALL e SCALES, 2007).

Em NERY (2013) foi apresentado uma metodologia de caracterização de minérios auríferos com baixos teores de ouro (< 1 ppm) por mineralogia quantitativa por feixe de elétrons e teve como principais resultados a identificação da distribuição do ouro, a proporção em cada fase mineral, as curvas de liberação do ouro e demais minerais de interesse.

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho é contribuir para o entendimento das associações mineralógicas bem como as características dos grãos de ouro em depósitos de baixo teor visando a caracterização mineralógica e suas associações e a relação teor de ouro e conteúdo de sulfetos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em um conjunto de amostras de testemunhos de sondagem e frentes de lavra, provenientes de campanhas de amostragem recentes. Três corpos principais, entre os intervalos 0-2500, 2500-4000 e acima de 4000 ppm de arsênio compõem a zona mineralizada de ouro. A relação arsênio/ouro é diretamente proporcional aos seus conteúdos.

O material analisado foi realizado em uma cominuição abaixo de 0,5 mm em britador de rolos, seguida de peneiramento a úmido em 0,020 mm. O produto retido em 0,020 mm foi concentrado por separação em líquido denso ($3,3 \text{ g/cm}^3$) para as observações sistemáticas dos grãos de ouro contidos nos produtos afundados.

Após a etapa de separação por líquidos densos (di-iodeto de metileno), o produto afundado ($d > 3,3 \text{ g/cm}^3$) foi amostrado em amostrador rotativo para confecção de seções polidas para a análise mineralógica quantitativa automatizada. Todos os produtos gerados foram analisados por *fire assay* para determinação de ouro, absorção atômica para dos teores de arsênio e analisador de carbono e enxofre para os teores de enxofre.

A caracterização das associações do ouro foi realizada somente no produto afundado, o qual responde por 70-80% do total contido, a fim de se determinarem as formas de ocorrência e associações do ouro com a ganga. No produto flutuado, o ouro ocorre normalmente em diminutas inclusões associadas à ganga silicática.

A busca automatizada pelos grãos de ouro foi efetuada por meio do software *Mineral Liberation Analyser* (MLA-FEI) acoplado a um microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 600FEG (FEI) com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) Quantax 600 (Bruker).

Para a busca automatizada do ouro e outros minerais de elevado número atômico, foi estabelecido como critério a faixa de tons de cinza relativa a estes minerais e, em cada imagem coletada, somente partículas portadoras de minerais presentes nesta faixa foram analisadas por EDS. As coordenadas (X,Y) de cada partícula analisada são armazenadas e, após a varredura de todas as seções, cada partícula pode ser observada em detalhe para aferir sua classificação e determinar as associações de ouro e de outros elementos de interesse presentes (Ag, Te, Pt, Pd, dentre outros), bem como a composição química dos grãos identificados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Número de campos analisados

Foi analisado um total de 329.559 partículas em 206 seções polidas com teores máximos de arsênio em 2500 ppm. Nessas seções, foram encontradas 526 partículas portadoras de 741 grãos de ouro. Para teores de arsênio entre 2500 e 4000 ppm, 174.230 partículas foram analisadas com 565 grãos de ouro encontrados. Por fim, para teores acima de 4000 ppm, 158.037 partículas em 52 seções foram analisadas com 805 grãos de ouro. Esses resultados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Total de campos analisados

Teor de arsênio (ppm)	total partículas	partículas com ouro	grãos Au	partículas com Au / total de partículas (%)
0 - 2500	329.559	526	741	0,16
2500 - 4000	174.230	369	565	0,21
> 4000	158.037	569	805	0,36

Os resultados indicam uma robustez estatística quanto ao total de partículas analisadas. A razão do total de partículas acima de 4000 ppm e a quantidade de partículas com ouro (0,36%) é o dobro em relação ao corpo de minério com teor de arsênio abaixo de 2500 ppm (0,16%) o que indica um aumento progressivo de ouro com a elevação dos teores de arsênio.

3.2 Análise granulométrica

As amostras, com suas frações analisadas (-0,50+0,020 e -0,020 mm), foram agrupadas conforme os intervalos de arsênio. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Análise granulométrica no intervalo de 0 - 2500 ppm.

Fração (mm)	Massa (%) ensaio	Teores			Distribuição no ensaio (%)		
		Au (ppm)	As (ppm)	S (%)	Au	As	S
-0,50+0,020	67,0	1,12	2154	1,53	94,8	81,2	87,0
-0,020	33,0	0,12	1008	0,46	5,2	18,8	13,0
Total Calc	100,0	0,79	1775	1,18	100,0	100,0	100,0

Tabela 3 - Análise granulométrica no intervalo de 2500 - 4000 ppm.

Fração (mm)	Massa (%) ensaio	Teores			Distribuição no ensaio (%)		
		Au (ppm)	As (ppm)	S (%)	Au	As	S
-0,50+0,020	70,0	0,94	3982	1,66	92,0	84,8	88,0
-0,020	30,0	0,19	1666	0,53	8,0	15,2	12,0
Total	100,0	0,71	3287	1,32	100,0	100,0	100,0

Tabela 4 - Análise granulométrica no intervalo acima de 4000 ppm.

Fração (mm)	Massa (%) ensaio	Teores			Distribuição no ensaio (%)		
		Au (ppm)	As (ppm)	S (%)	Au	As	S
-0,50+0,020	73,3	3,74	7792	2,23	96,6	83,6	87,5
-0,020	26,7	0,36	4213	0,88	3,4	16,4	12,5
Total	100,0	2,84	6837	1,87	100,0	100,0	100,0

Observa-se a partir dos dados apresentados, que o teor de enxofre nas amostras varia de 1,18 e 1,87%, sendo o intervalo 2500 – 4000 ppm com uma leve queda no teor de ouro em relação ao intervalo 0 – 2500 ppm. O intervalo com mais alto teor, encontra-se com teor de arsênio de 6837 ppm e 1,87% de enxofre com ocorrência proporcional ao teor de ouro. Os teores de enxofre e arsênio estão associados principalmente a ocorrência de minerais de sulfetos como pirita, arsenopirita, galena, esfalerita e pirrotita.

3.3 Tamanho de grãos de ouro

A distribuição de tamanho dos grãos de ouro identificados (diâmetro de círculo equivalente), com respectivo tamanho médio (d50), é apresentada na Figura 1.

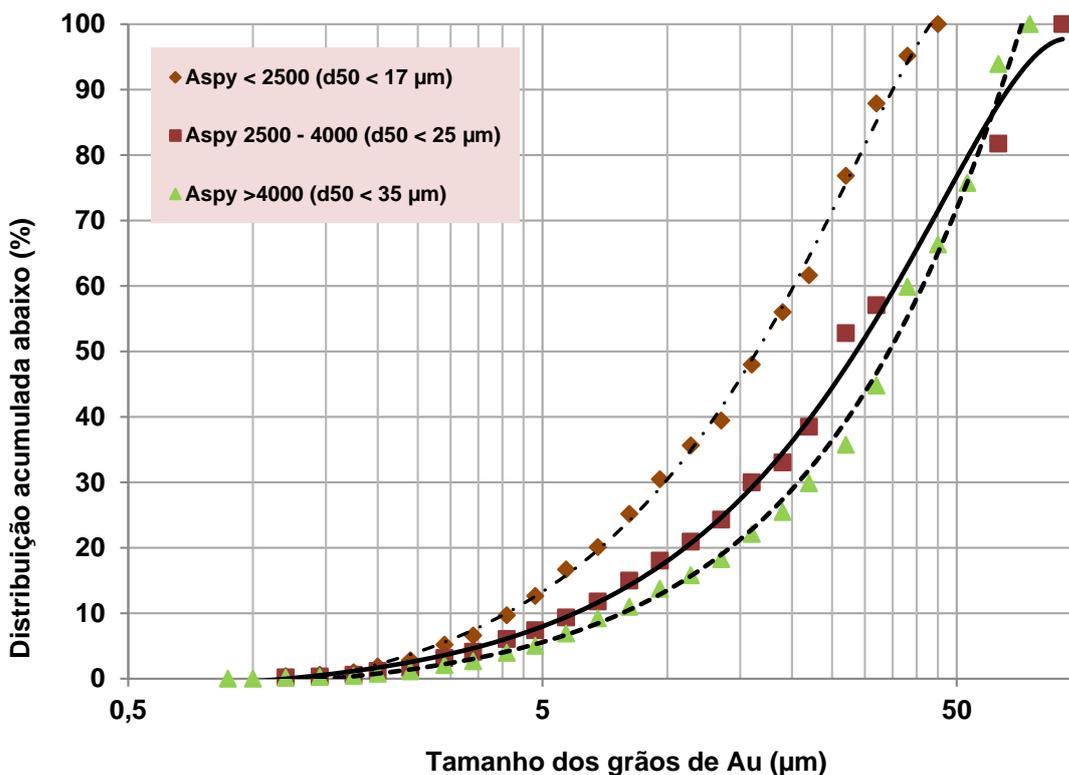


Figura 1 - Distribuição de tamanho dos grãos de ouro (total -0,50+0,020 mm, afundado. 3,30 g/cm³).

As curvas de distribuição de tamanho dos grãos de ouro seguem a tendência em relação ao conteúdo de arsênio, ou seja, quando maior o teor de arsênio, maior a tendência em relação ao seu diâmetro equivalente de ouro. Espera-se, em corpos de minério de alto teor de arsênio, que ocorram grãos de ouro com uma distribuição mais grossa. A Figura 2 mostra a proporção do tamanho médio para os três corpos de minério. Observa-se que para o corpo de minério 2500-4000 ppm o tamanho médio de ouro é 47% maior que o corpo 0-2500 ppm e o minério com teor de arsênio maior que 4000 ppm é 105% maior em relação ao primeiro.

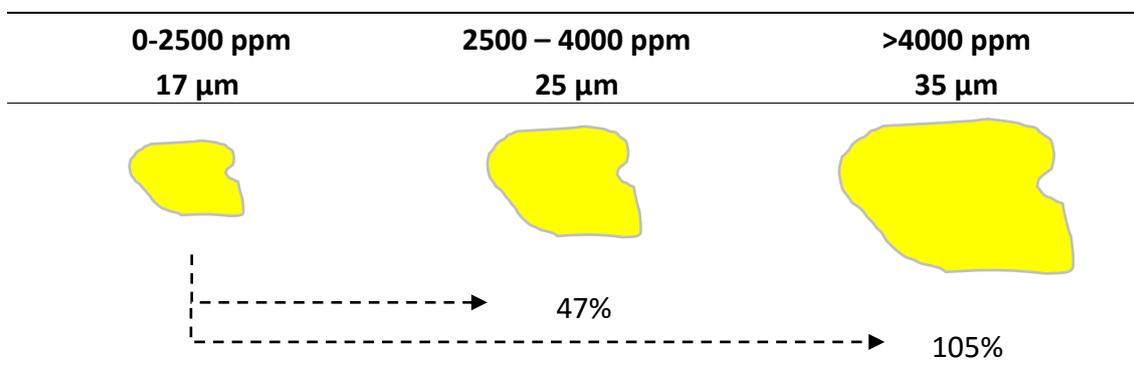


Figura 2 – Proporção em relação ao D₅₀ para cada tipo de minério

3.4 Acessibilidade

Através do perímetro exposto de cada grão de ouro identificado no MLA foi possível estimar a proporção de ouro acessível (Figura 3). Para termos um exemplo, uma partícula livre de ouro está 100% liberada e acessível. A estimativa da parcela de ouro acessível é apresentada na Figura 4.

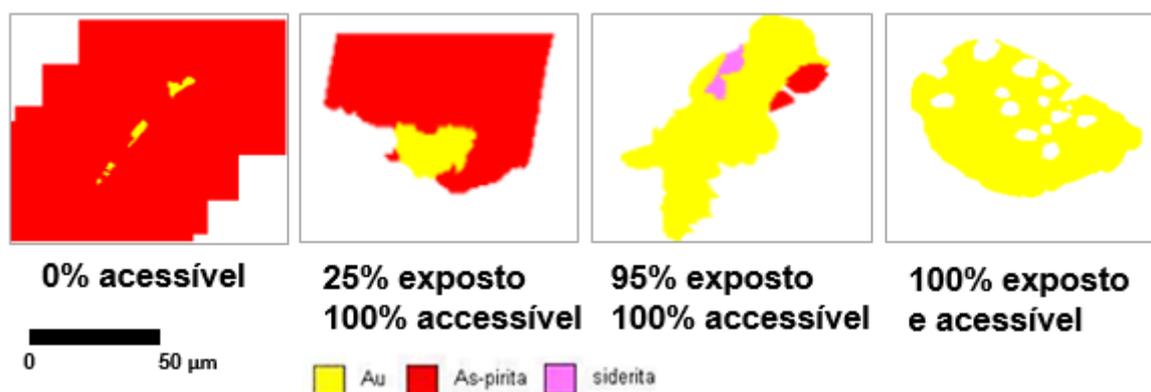


Figura 3 – Partículas portadoras de ouro - acessibilidade

Para efeito de cianetação, deve-se considerar tanto a proporção de ouro exposto como acessível por microfaturas, sendo esta última impossível de ser determinada por análise automatizada 2D.

As porcentagens em área dos grãos de ouro com perímetro exposto a partir de medidas 2D por MEV-MLA aumentar gradativamente conforme o aumento dos teores de arsênio. Um conjunto de amostras com teores médio abaixo de 2500 ppm de arsênio mostram uma relação de 81% de exposição de ouro e para teores entre 2500-4000 ppm, 83% de perímetro exposto. Um limite superior acima de 4000 ppm, há um aumento progressivo na exposição de ouro para 90%.

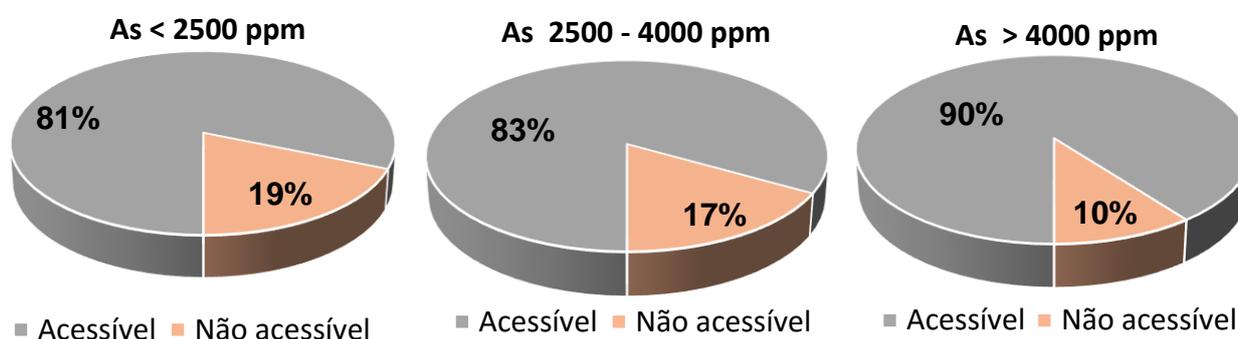


Figura 4 – Grau de acessibilidade em relação aos teores de arsênio.

4 CONCLUSÕES

A identificação e estudo das diferenças de composição mineralógica e, principalmente, das associações do ouro para cada corpo de minério são fundamentais para o direcionamento do processamento de minérios auríferos, sendo que a análise automatizada de imagens por feixe de elétrons permite essa quantificação com robustez estatística e em menor tempo possível. O uso da

ferramenta automatizada (MLA) mostrou-se eficiente principalmente na quantidade de partículas analisadas e grau do perímetro exposto de ouro.

Os resultados mostram que para corpos com alto teor de arsênio (4000 ppm), o aumento da acessibilidade ao ouro é por volta de 10% em relação aos teores abaixo de 2500 ppm e substancial aumento no tamanho médio dos grãos de ouro. O aumento da acessibilidade e tamanho médio dos grãos de ouro indica que o há um potencial aumento na recuperação devido a maior exposição de ouro em solução de cianeto.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IBRAM (2011). Instituto Brasileiro de Mineração: Informações e análises da economia mineral brasileira. Brasília. 6 edição, 28 p.
2. GRANT, G.; REID, A. F.; ZUIDERMYK, M. (1979). Simplified size and shape description of ore particles as measured by automated SEM. International powder and bulk solids handling and processing, Philadelphia, Pennsylvania
3. GOODALL, W. R., SCALES P. J. (2007). An overview of the advantages and disadvantages of the determination of gold mineralogy by automated mineralogy. In.: Minerals Engineering 20, p. 506–517.
4. Nery, G., Ulsen, C., Kahn, H., Tassinari, M., & Uliana, D. (2014). CARACTERIZAÇÃO DE OURO POR ANÁLISE DE IMAGEM AUTOMATIZADA POR FEIXE DE ELÉTRONS. HOLOS, 3, 3-10. doi:<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2014.1786>
5. PETRUK, W. (2000). Applied Mineralogy in the Mining Industry. 1. Elsevier Science.