

ASSOCIAÇÃO OURO E SULFETOS E SUAS RELAÇÕES

COSTA, F.R.¹, NERY, G.P.², ULSEN, C.³, KAHN, H.⁴.

¹Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Mina e de Petróleo. fab.costa@usp.br

²Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Mina e de Petróleo. guilherme@lct.poli.usp.br

³Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Mina e de Petróleo. carina@lct.poli.usp.br

⁴Universidade de São Paulo – Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Mina e de Petróleo. henrique@lct.poli.usp.br

RESUMO

Inserida como uma ferramenta na caracterização tecnológica, a análise de imagens automatizada tem importante papel no setor mineral, principalmente pela rapidez das análises, robustez estatística e confiabilidade nos resultados. A principal inovação é na automatização dos resultados advindos de imagens de microscopia eletrônica de varredura quando associada a microanálises químicas, podendo ser utilizadas em diversas etapas de um empreendimento mineiro.

Este trabalho tem como objetivo a associação de ouro e sulfetos da Morro do Ouro, Minas Gerais na qual foi possível avaliar as relações em um conjunto de 88 amostras.

Verificou-se que 90% do ouro está na fração acima de 0,020 mm; o quartzo e mica representam cerca de 80% da massa total do minério. O produto pesado é representado por pirita e arsenopirita, com pirrotita, calcopirita, esfalerita e galena subordinada. O ouro está majoritariamente associado à pirita e arsenopirita e com o aumento de teor de arsênio, cresce a parcela de ouro associado à arsenopirita.

PALAVRAS-CHAVE: Caracterização tecnológica; minério de ouro; arsenopirita.

ABSTRACT

Being one of commonly used tools in mineral characterization, automated image analysis plays an important role in the mining sector mainly due to its rapid analysis, statistical robustness and reliability of the results. The technique can be performed using images acquired in a scanning electron microscope, usually associated with chemical microanalysis having applications in different stages of a mining venture.

The following study aims to produce a mineral characterization using an automated image analysis technique by MLA in a set of 88 samples from the Morro do Ouro gold mine, located in Minas Gerais State, Brazil.

Results showed that 90% of gold content is above the 0,02mm size fraction; quartz and mica are the mayor mineral phases identified representing roughly 80% of the total; sulfides have equivalent circle diameter ranging from 80 to 100 μm present mainly as pyrite and arsenopyrite.

KEYWORDS: Mineral Characterization, gold ore, arsenopyrite.

1. INTRODUÇÃO

Em unidade de beneficiamento de minérios de ouro, as instalações de processamento respondem por grande parte do gasto geral no empreendimento mineiro. Um estudo focado na mineralogia e no desempenho do minério em relação à previsibilidade do produto, promoveria uma melhor alternativa de redução desses custos.

Dentro dessa perspectiva, a área de estudo está localizada no município de Paracatu, Minas Gerais, e responde por 29% da produção nacional de ouro (IBRAM, 2012).

A caracterização tecnológica está ligada ao estudo de aspectos específicos dos corpos de minério e produtos da usina e fornece subsídios para metalurgistas, engenheiros de processos e geólogos no planejamento de lavra e desenvolvimento e otimização do processo de beneficiamento de minérios (HENLEY, 1983) e pode ser utilizada através da análise de imagens na determinação da mineralogia quantitativa, grau de liberação mineral, distribuição granulométrica de grãos, partículas e suas inclusões, associações minerais, entre outras características relacionadas à sua morfologia (PETRUK, 2000). Para FORTEY (1995), o termo se refere à análise computacional das informações quantitativas coletadas de forma digital.

A conexão entre a mineralogia e o desempenho do minério na usina já era descrito desde a década de 1970, com a caracterização de partículas quanto ao tamanho e composição determinada por microscopia eletrônica de varredura (GRANT et al., 1977). Após essa década, houve uma popularização do uso desta técnica juntamente com avanço dos equipamentos e desenvolvimento de sistemas acoplados com EDS e análise de imagens, como QEMSCAN e, posteriormente, o MLA - *Mineral Liberation Analyser*. O MLA é um sistema que possui grande diferencial já que é um mecanismo que permite combinar análise de imagens por elétrons retroespalhados (BSE) e espectros de raios X característicos (GU, 2003).

No presente trabalho foi analisado amostras de minério de ouro visando a associação de ouro e sulfetos e suas relações quanto a composição mineralógica e associações entre os sulfetos e grãos de ouro.

2. MATERIAS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em um conjunto de 88 amostras provenientes da mina Morro do Ouro, Paracatu, noroeste de Minas Gerais.

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 (2,96 g/cm³) para observações sistemáticas. A forma de ocorrência e associações de sulfetos foi efetuada a partir de alíquota do material bulk.

Após a amostragem (micro-amostrador rotativo Microscal MSR) foram confeccionadas seções polidas para análise da mineralogia (seção polida transversal) e seções para os produtos afundados em líquido denso (-0,50+0,02 mm; seção convencional centrifugada). Em ambos, foram confeccionadas 3 seções para cada amostra.

A composição química das amostras foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (sem padrões), *fire assay* para determinação de ouro, pirólise em forno de indução para enxofre e ICP-OES para arsênio.

Os estudos mineralógicos foram efetuados de forma automatizada em seções polidas utilizando software MLA - *Mineral Liberation Analyser* (FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 600 FEG (FEI) e espectrômetro por dispersão de energia (EDS) Quantax 4030 com software Esprit (Bruker).

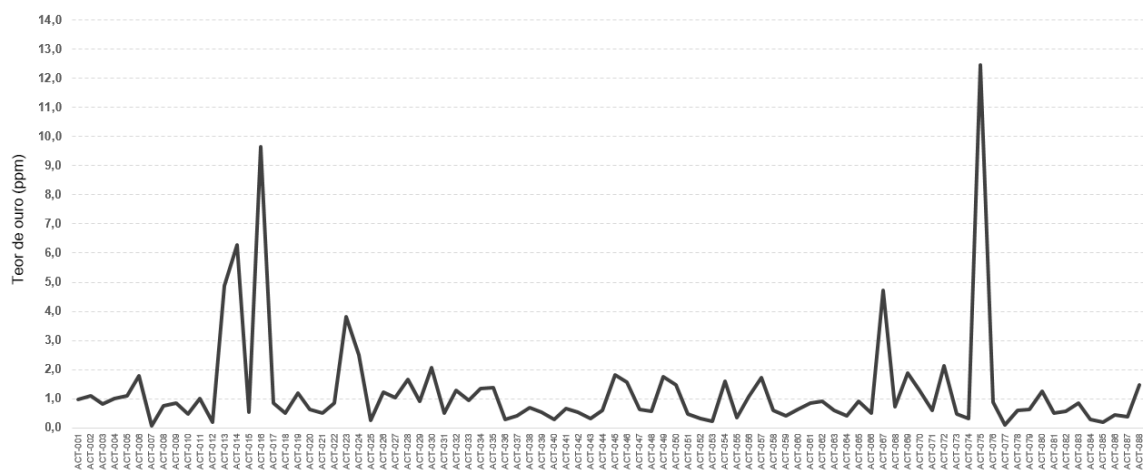
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Composição química

Os teores obtidos por fluorescência de raios X mostram elevado conteúdo de SiO_2 nas amostras (53,1 a 75,6%) devido principalmente a presença majoritária de quartzo. O Al_2O_3 apresenta teores entre 7,0 e 17,3%, MgO de 0,55 a 1,46%, Na_2O de 0,14 a 1,2% e K_2O entre 2,64 e 6,85%; esses óxidos estão presentes principalmente na clorita, mica, caulinita e albita.

Os teores de arsênio ocorrem em uma ampla variação de teores, com mínimo de 229 ppm e máximo de 9121 ppm; os teores de enxofre variam entre 0,01% e 4,51%. Alguns *outliers* de teor de ouro podem ocorrer devido principalmente a presença de pepitas de ouro livres. A Figura 1 mostra os teores de ouro e a presença de pepita nas amostras (ACT-013, 018, 023, 067 e 075).

Figura 1 – Teor de ouro nas amostras.



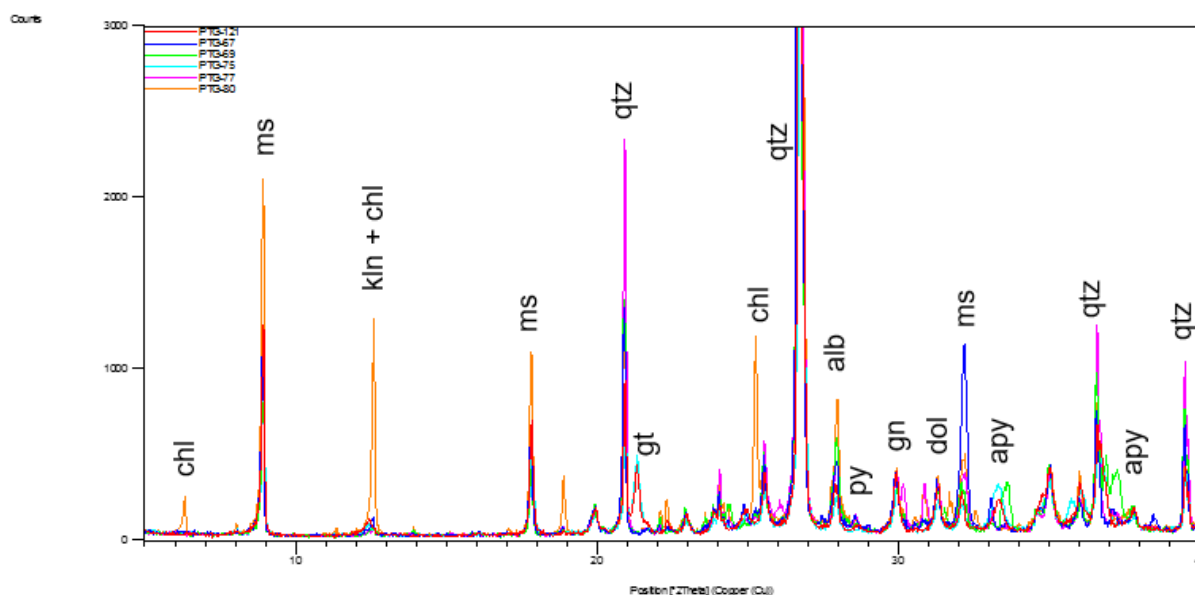
3.2. Difratometria de raios X

Os difratogramas de raios X obtidos para as amostras apresentaram semelhanças em termos de posição e intensidades relativas entre picos, o que mostra uma mineralogia semelhante entre as amostras.

A Figura 2 apresenta a sobreposição dos 88 difratogramas gerados para cada amostra.

O eixo x da figura traz a posição ($^{\circ}2\theta$) entre 5 e 40° com a identificação dos picos relacionados às principais fases minerais constituintes. Observa-se que alguns picos ocorrem em amostras específicas, como por exemplo, fase constituída por caulinita + clorita (pico em laranja) e goethita (pico em vermelho).

Figura 2 - Sobreposições dos difratogramas de raios X das amostras estudadas.

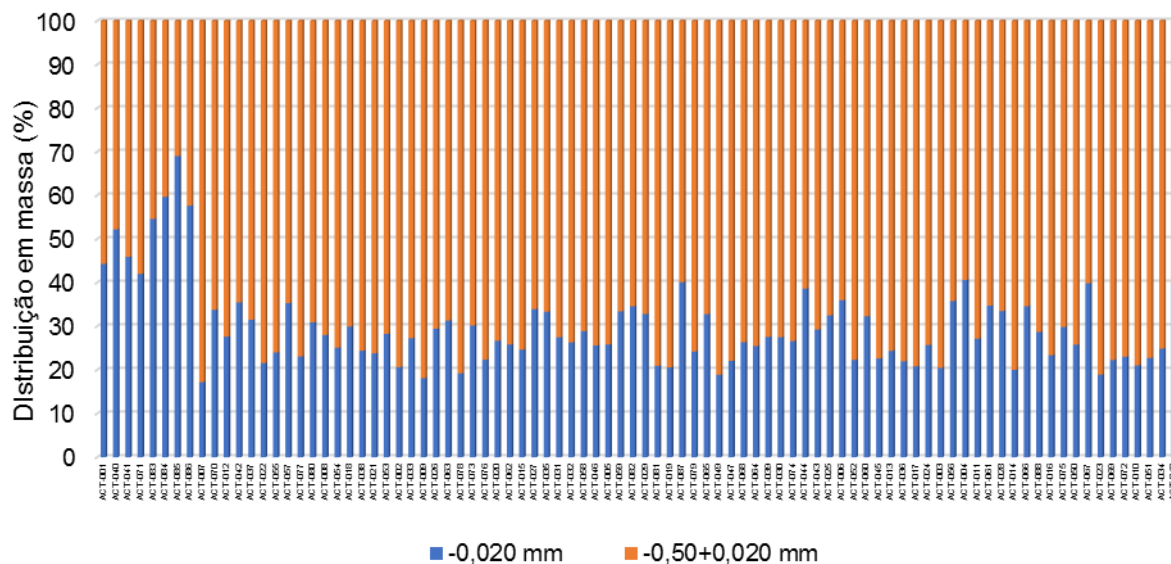


Legenda: chl: clorita; ms: muscovita; kln: caulinita; qtz: quartzo; gt: goethita; alb: albita; dol: dolomita; py: pirita; apy: arsenopirita; gn: galena.

3.3. Distribuição granulométrica

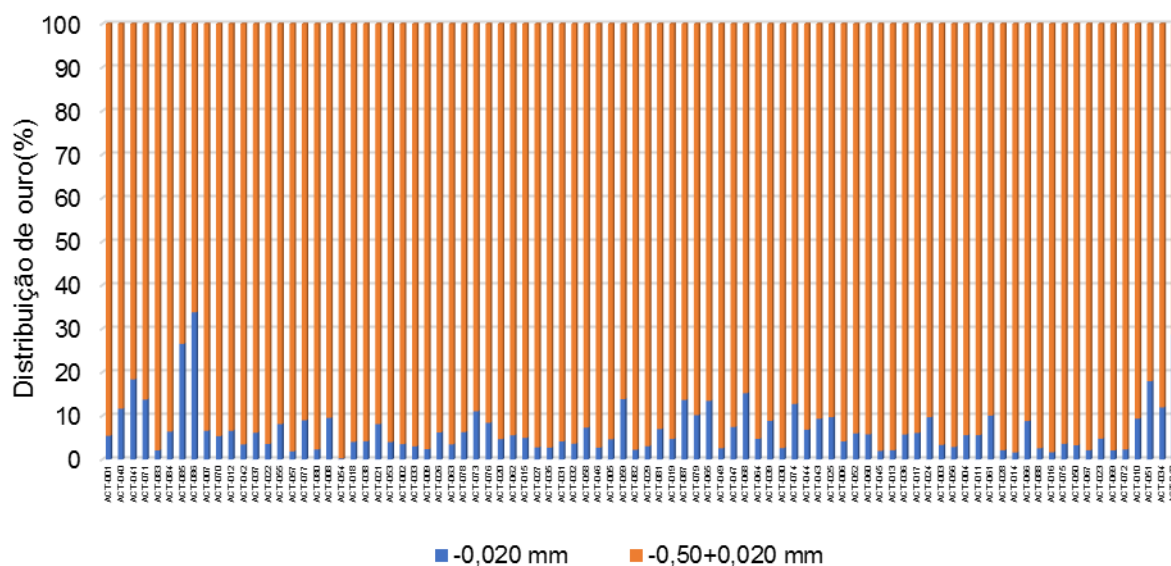
A distribuição de massa nas amostras está exposta na Figura 3. Os dados mostram que em média, 20 a 30% das amostras constituem material passante em 0,020 mm nas condições de cominuição empregadas (<0,50 mm).

Figura 3 - Distribuição de massa para peneiramento em 0,020 mm.



A distribuição de Au para os produtos gerados no peneiramento em 0,020 mm é apresentado Figura 4 e indica que em média de 93% do ouro contido na amostra está associado ao material retido na fração acima de 0,020 mm.

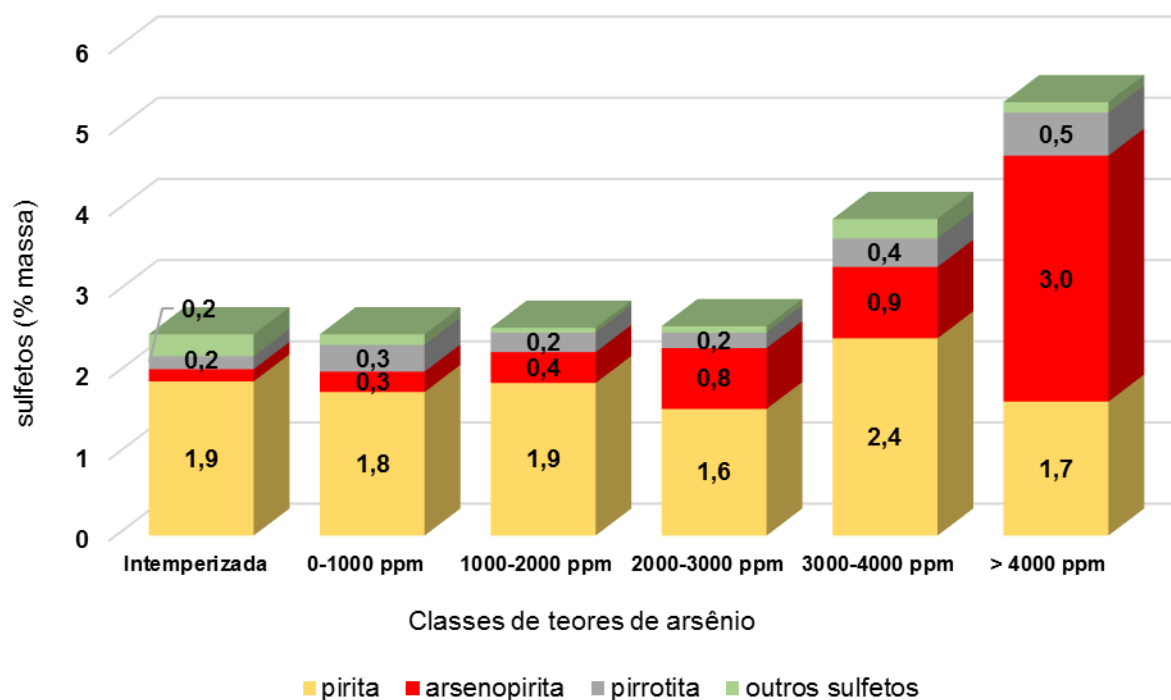
Figura 4 - Distribuição de ouro para peneiramento em 0,020 mm



3.4. Composição Mineralógica

O agrupamento das amostras foi efetuado a partir das composições químicas em relação ao seu conteúdo de arsênio em intervalos de 1000 em 1000 ppm. As identificações minerais efetuadas nas amostras (tal qual) pela discriminação entre as fases foi estabelecida através da análise em modo XBSE no sistema MLA. O conteúdo de sulfetos nas classes definidas é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição mineralógica dos sulfetos nas amostras – classes de teor de arsênio (% massa; fração -0,50+0,020 mm).

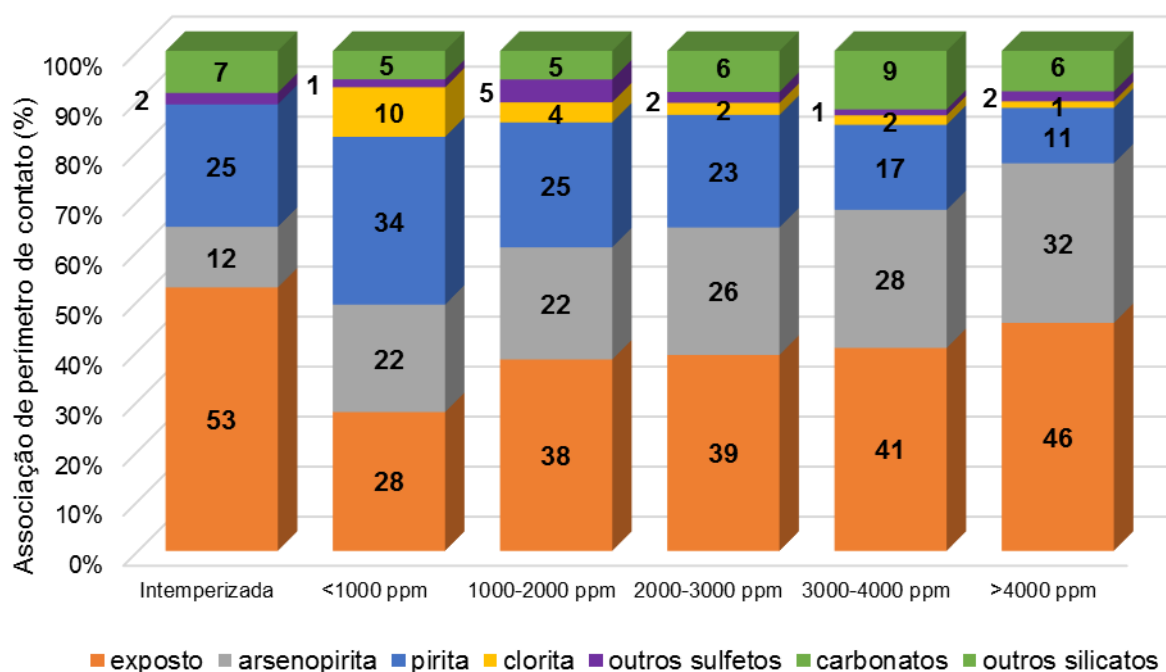


Outros sulfetos: calcopirita, esfalerita e galena

O conteúdo médio total de sulfetos é praticamente o mesmo para o material intemperizado e para as classes com até 3000 ppm de As (cerca de 2,5% em massa); a partir daí, os conteúdos de sulfetos aumentam expressivamente. Os outros sulfetos (calcopirita, esfalerita e galena) respondem por aproximadamente 0,2% da massa total das massas.

Conforme a Figura 6, a associação de ouro com os principais sulfetos (pirita, pirrotita e arsenopirita) ao longo das classes mostram uma tendência de acréscimo no conteúdo de arsenopirita e decréscimo na de pirita. Ocorre uma variação brusca no conteúdo de arsenopirita e da relação arsenopirita/pirita para a classe de arsênio acima de 4000 ppm; o teor médio de arsênio passa de 3170 (classe 3000-4000 ppm) para 8346 ppm.

Figura 6 - Distribuição da associação mineral por perímetro de contato – associação do ouro com os principais minerais - fração -0,50+0,020 mm.



Legenda: outros sulfetos: pirrotita, calcopirita, esfalerita e galena; Carbonatos: anquerita e siderita; outros silicatos: quartzo, albita mica e outros (goethita foi incluída no grupo dos silicatos); outros: albita, anquerita, ilmenita, rutilo, goethita, zircão, cromita, monazita, FeAsO, AlFe-PbAsO, apatita.

4. CONCLUSÕES

A composição química das amostras, determinadas por espectrometria de fluorescência de raios X mostrou um elevado conteúdo de SiO₂ relacionados principalmente a presença de boudins de quartzo. A mineralização de ouro ocorre principalmente associada a esses boudins, em concentrações sulfetadas na forma de clusters sulfetados. Conteúdo de Al₂O₃, MgO, Na₂O e K₂O estão presentes devido a recorrência de mica, caulinita e albita nas amostras.

Para cominuição abaixo de 0,50 mm a distribuição em massas das amostras no peneiramento em 0,020 mm mostrou uma média de 20 a 30% na fração passante. Algumas amostras apresentaram fora da média; com valores acima de 40% em massa abaixo da fração 0,020 mm, o que sugere amostras mais intemperizadas.

A difratometria de raios X apresentou a recorrência de quartzo e muscovita em todas as amostras. Constituintes minerais em menores proporções tais como feldspato (albita), goethita, clorita (clinocloro), caulinita, sulfetos (arsenopirita, pirita, galena) e duas variedades de carbonatos: anquerita e siderita, ocorrem em proporções variadas nas amostras.

As composições mineralógicas nos materiais obtidas por MEV-MLA para a fração 0,50+0,020 mm confirmam a presença considerável de quartzo e mica, que somadas representam cerca de 80% da massa total das amostras.

Em termos de associações minerais verifica-se que de maneira geral, o ouro está em grande parte associado aos sulfetos com pouca contribuição nos silicatos, carbonatos e outros sulfetos (calcopirita, esfalerita e galena); com o aumento de teor de arsênio, cresce a parcela de ouro associado à arsenopirita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FORTEY, N. J. Image analysis in mineralogy and petrology. **Mineralogical Magazine**. vol. 59, p. 177–178, 1995.

GRANT, G., HALL J.S., REID, A.F., ZUIDERWYK, M.A. Characterisation of particulate and composite mineral grains by on-line computer processing of SEM images. In: **Proceedings 15th APCOM Symposium**, Brisbane, Australia, pp. 159–169, 1977.

GU, Y. Automated scanning electron microscope based mineral liberation analysis. An introduction to JKMRC/FEI Mineral Liberation Analyser. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 2, n. 1, p. 33–41, 2003.

HENLEY, K. J. Ore-Dressing Mineralogy - a review of techniques, applications and recent developments, **Geological Society of South Africa**, vol 7(7), p. 175-200, 1983.

IBRAM. Ouro. Anuário Brasileiro Mineral, v. 7, p. 55–57, 2012.

PETRUK, W. **General principles of applied mineralogy**. 2000.