

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE ENXOFRE COMO INDICADORES DA GÊNESE DE SULFETOS ASSOCIADOS A MINERALIZAÇÃO DE OURO DO GRUPO SERRA DO ITABERABA (GUARULHOS, SP)

Garda, G.M.¹, Beljavskis, P.¹, Juliani, C.¹, Boyce, A.J.²

¹Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, 05508-900 – São Paulo – SP

²Scottish Universities Research and Reactor Centre, Rankine Avenue, East Kilbride G75 0QU, UK

ABSTRACT Sulphur stable isotope data helped constrain four stages of sulphidation in the Tapera Grande and Quartzito areas of the Serra do Itaberaba Group (Guarulhos-SP, Brazil). Stage I is represented in the Tapera Grande area by pre-S₁ pyrite, later metamorphosed to pyrrhotite ($-5.47 < \delta^{34}\text{S} < -8.7$ per mil), deposited together with gold-bearing graphite pelites, during the opening of the Morro da Pedra Preta Formation ocean basin. Following the deposition of pelites, psamites, chemical sediments, iron formations, calc-silicate rocks, and basic rocks associated with acid, intermediate and volcanoclastic rocks, backarc basin conditions were installed and Stage II sulphides penetrated intergranular spaces and microfractures, probably coeval with S₃/S₄ structures developed during ductile-brittle events that followed deformation and metamorphism. $\delta^{34}\text{S}$ values obtained for pyrite/pyrrhotite crystals from gold-bearing quartz veins crosscutting volcanoclastic rocks from both Tapera Grande and Quartzito fall within a +4.48 to +7.36 per mil range. Stage III is best represented in Quartzito. When not isolated, chalcopyrite fills cavities or grows along faces and corners of Stage II pyrite crystals. These chalcopyrite crystals yield $\delta^{34}\text{S}$ values between 3.6 and 2.6 per mil. Free gold was found associated with their alteration to chalcocite and covellite. In Stage IV, pyrite predominates ($2.4 \text{ per mil} < \delta^{34}\text{S} < 2.9 \text{ per mil}$). Lower-temperature, submicroscopic galena ($\delta^{34}\text{S} \approx 1 \text{ per mil}$), Ag-bearing Bi tellurides and REE minerals occur isolated or filling cavities and fractures of the sulphides from the previous stages. Molybdenite ($\delta^{34}\text{S} \approx 3 \text{ per mil}$) and scheelite may be associated either with stages III or IV. Negative $\delta^{34}\text{S}$ values favour a sedimentary origin for Stage I sulphides (and associated gold) whereas positive and decreasing $\delta^{34}\text{S}$ values for stages II to IV mark epigenetic sulphide deposition associated with shearing and probably deep-seated granitoid rocks.

INTRODUÇÃO As mineralizações de ouro no Estado de São Paulo ocorrem em seqüências precambrianas metamorfizadas (grupos Açungui, Serra do Itaberaba e São Roque e complexos Embu e Varginha). O Grupo Serra do Itaberaba foi cenário da exploração de ouro nos séculos XVI e XVII, destacando-se os depósitos aluviais do Ribeirão das Lavras (Noronha 1960). Após a exaustão das minas, depósitos mais ricos passaram a ser explorados em Minas Gerais, Bahia, Goiás e Mato Grosso.

No início dos anos 80, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) desenvolveu vários projetos visando a avaliação de áreas mineralizadas em ouro. Por exemplo, no Grupo Serra do Itaberaba foram individualizados corpos de rochas vulcanoclásticas com indícios de mineralização de ouro e delimitados colúvios auríferos na área Tapera Grande, incluindo as antigas catas de ouro do Ribeirão das Lavras (Beljavskis 1988).

Segundo Juliani *et al.* (1995), concentrações de ouro entre 0.1-1.5 g/m³ foram

detectadas ao longo do Ribeirão das Lavras, em material coluvial com espessura entre 0,5-2,5 m. Concentrados de bateia individualizaram grãos finos de ouro ($< 0,15$ mm) e pepitas com mais de 1 mm de diâmetro. Concentrações da ordem de 0,2 a 0,36 g Au/m³ e pepitas com até 0,42 g foram encontradas respectivamente em aluvião com espessura entre 1,0-1,4 m e em amostra de nível de cascalho no depósito aluvionar.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO As formações Morro da Pedra Preta, Pirucaia e Nhanguçu compõem o Grupo Serra do Itaberaba (Fig. 1). As áreas Tapera Grande e Quartzito inserem-se na Formação Morro da Pedra Preta, composta por uma grande variedade de metamorfitos que constituem a seqüência basal do Grupo Serra do Itaberaba.

Na área Tapera Grande foram reconhecidas rochas da seqüência vulcano-sedimentar da Formação Morro da Pedra Preta, formada por rochas metabásicas, metatufos básicos e rochas vulcanoclásticas, associadas a xistos bandados finos, filitos rítmicos, xistos grafitosos, turmalinitos, formações ferríferas bandadas e rochas cálcio-silicáticas. A seqüência é cortada por rochas graníticas.

Na área Quartzito aflora metachert ferruginoso, posicionado entre metatufos e rochas cálcio-silicáticas. Marunditos, metapelitos, rochas cálcio-silicáticas, metatufos básicos e metabasitos da Formação Morro da Pedra Preta também são reconhecidos nos testemunhos de sondagem. A seqüência é afetada pela Falha de Sertãozinho e fraturamento associado. Veios de quartzo, em especial os associados com zonas de brecha, apresentam sulfetos e quantidades variáveis de turmalina.

ESTÁGIOS DE SULFETIZAÇÃO Beljavskis *et al.* (1999a, 1999b) definiram quatro estágios de sulfetização que afetaram Tapera Grande e Quartzito:

Estágio I – O sulfeto predominante é pirrotita (Po), resultante do metamorfismo de pirita, que se encontra disseminada ou concentrada em bandas paralelas a S₁. As bandas estão dobradas (D₁/D₂) e cisalhadas. (Fig. 2). Grãos submicrométricos de ouro (ca. 1 µm) foram detectados pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), disseminados nos grafita xistos e turmalinitos correlatos.

Estágio II – Na área Quartzito os sulfetos deste estágio associam-se a veios de quartzo que cortam a Formação Morro da Pedra Preta e são, em geral, piritas de aspecto “poroso” (Fig. 3).

Em Tapera Grande, os sulfetos claramente preenchem espaços intergranulares e microestruturas, concordantes ou não com as S₃/S₄ geradas pelos eventos dúcteis-rúpteis. Comumente pirita/pirrotita forma massas e/ou buchos associados aos minerais máficos (hornblenda e biotita) e quartzo.

Estágio III – Em Quartzito, calcopirita aparece tanto ao redor preenchendo cavidades das piritas “porosas” do Estágio II (Fig. 3), ou isoladas, ou preenchendo fraturas da rocha hospedeira.

Estágio IV – Em Tapera Grande, galena e teluretos preenchem não apenas microfraturas das piritas do Estágio II, mas também ocorrem ao longo das bordas e faces dos minerais predominantes. Em Quartzito, calcopirita e pirita apresentam partes substituídas por sulfetos de Zn-Cd (Fig. 4 e Garda *et al.* 1999). Molibdenita, scheelita, prata, electrum e galena também foram identificados pelo MEV, assim como teluretos de Bi e fosfatos de elementos terras raras.

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE ENXOFRE Análises dos isótopos estáveis de enxofre foram realizadas no Scottish Universities Research and Reactor Centre (SURRC, East Kilbride, Escócia), sendo utilizado o método de extração de SO_2 a laser (Kelley & Fallick 1990). O método permite análises *in situ* com resolução espacial da ordem de 100 μm (Fallick *et al.* 1992). SO_2 e outros gases são produzidos pela reação do sulfeto com O_2 sob altas temperaturas, geradas pelo laser. Os gases indesejáveis são eliminados e o SO_2 é introduzido em um espectrômetro de massa acoplado ao extremo final da linha de extração. São obtidos valores de $\delta^{66}\text{SO}_2$, convertidos para $\delta^{34}\text{S}$ por meio de um programa apropriado. Corrigem-se os valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtidos para o gás aplicando-se fatores de fracionamento específicos, resultando nos valores de $\delta^{34}\text{S}$ do sulfeto analisado.

A Tabela 1 apresenta os resultados finais das análises correspondentes aos sulfetos representativos dos estágios de sulfetização acima descritos. Observa-se que valores próximos a zero per mil foram obtidos para a amostra IQ-01, onde calcosina aparece alterando calcopirita (Fig. 5).

CONCLUSÕES Como mostram a Tabela 1 e a Figura 6, os valores negativos de $\delta^{34}\text{S}$ correspondem às pirrotitas do Estágio I da área Tapera Grande. Velasco *et al.* (1998) obtiveram valores de $\delta^{34}\text{S}$ negativos para sulfetos do Cinturão Pirítico Ibérico, com texturas primárias diagenéticas, derivados da redução bacteriológica de sulfato presente na água do mar. O mesmo se aplica à área Tapera Grande, com a indicação adicional de que o metamorfismo não alterou a assinatura isotópica dos sulfetos do Estágio I. A identificação de ouro submicrométrico pelo MEV em rochas da seqüência vulcano-sedimentar da área Tapera Grande, depositada em águas profundas, reforça os resultados obtidos pelo estudo de isótopos estáveis, ou seja, sulfetos e ouro associado de origem sedimentar.

Valores de $\delta^{34}\text{S}$ positivos para a área Quartzito distribuem-se segundo dois grupos: 3,6-6,6 per mil (correspondendo aos estágios II e III) e 1-3 per mil (Estágio IV). As calcopiritas do Estágio III forneceram valores de $\delta^{34}\text{S}$ mais baixos do que aqueles correspondentes às pirritas do Estágio II (*e.g.* amostra FQ112-34(2), Tab. 1).

Não foi detectado pelo MEV ouro como inclusões nas calcopiritas e pirritas. Grãos de ouro milimétricos foram encontrados associados com calcocita e covelina formadas a partir de calcopirita (Fig. 5), o que pode indicar que enriquecimento supérgeno deve ter concentrado ouro em níveis mais rasos, gerando os pequenos depósitos explorados no século XVII em São Paulo.

AGRADECIMENTOS Os autores agradecem o Prof. Anthony E. Fallick por disponibilizar os laboratórios de isótopos estáveis do SURRC e à FAPESP pela concessão de auxílios para o uso do microscópio eletrônico de varredura (Proc. FAPESP 95/3665-3 e 98/05526-9) e os estudos de isótopos estáveis no SURRC (Proc. FAPESP 99/05792-3).

BIBLIOGRAFIA

- Beljavskis, P. 1988. *Prospecção geoquímica experimental na ocorrência de ouro Tapera Grande - Guarulhos - SP*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação de Mestrado, 161p.
- Beljavskis, P.; Garda, G.M.; Sayeg, I.J. 1999a. Application of SEM in the study of gold mineralizations in the Morro da Pedra Preta Formation, Grupo Serra do

- Itaberaba – São Paulo, Brazil. *Acta Microscopica* 8(Supplement A): 125-126.
- Beljavskis, P.; Juliani, C.; Garda, G.M.; Xavier, R.P.; Bettencourt, J.S. 1999b. Overview of the gold mineralization in the metavolcanic-sedimentary sequence of the Serra do Itaberaba Group – São Paulo – Brazil. In: Stanley, C.J. *et al.* 1999. *Mineral deposits: Processes to processing*. Balkema, v.1:151-153.
- Fallick, A.E.; McConville, P.; Boyce, A.J.; Burgess, R.; Kelley, S.P. 1992. Laser microprobe stable isotope measurements on geological materials: some experimental considerations (with special reference to $\delta^{34}\text{S}$ in sulphides). *Chemical Geology* 101:53-61.
- Garda, G.M.; Beljavskis, P.; Sayeg, I.J. 1999. Gold mineralization in the Quartzito area, the Serra do Itaberaba Group – São Paulo, Brazil. *Acta Microscopica* 8(Supplement A): 127-128.
- Juliani, C. 1993. *Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das Serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado, 684p.
- Juliani, C.; Beljavskis, P.; Oliveira-Juliani, L.J.C.; Garda, G.M. 1995. As mineralizações de ouro de Guarulhos e os métodos de sua lavra no período colonial. *Geologia Ciência-Técnica* 13:8-25.
- Kelley, S.P. & Fallick, A.E. 1990. High precision spatially resolved analysis of $\delta^{34}\text{S}$ in sulphides using a laser extraction technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54:883-888.
- Noronha, A.V. 1960. Guarulhos, cidade símbolo. *História de Guarulhos*. São Paulo, Schmidt, 113p.
- Velasco, F.; Sánchez-España, J.; Boyce, A.J.; Fallick, A.E.; SÁEZ, R.; Almodóvar, G.R. 1998. A new sulphur isotopic study of some Iberian Pyrite Belt deposits: evidence of a textural control on sulphur isotope composition. *Mineralium Deposita* 34:4-18.

Tabela 1 - Valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtidos pelo método de extração a laser
(SRT = Área Tapera Grande; F, FQ, IQ = Área Quartzito)

Amostra	Sulfeto	$\delta^{34}\text{S}$ (per mil)	Amostra	Sulfeto	$\delta^{34}\text{S}$ (per mil)
SRT11-111	pirrotita	-8.70	FQ-112-43	pirita	4.66
SRT11-111	pirrotita	-7.49	FQ-112-46	pirita	5.43
SRT11-111	pirrotita	-6.71	FQ112-46(2)	molibdenita	2.34
SRT11-111	pirrotita	-6.15	FQ112-46(2)	molibdenita	3.01
SRT11-111	pirrotita	-5.47	FQ112-46(2)	calcopirita	4.88
SRT11-145	pirrotita	-7.88	FQ112-46(2)	pirita	5.30
SRT11-145	pirrotita	-7.36	SRT1-2	pirita	4.48
SRT11-145	pirrotita	-7.30	SRT1-2	pirita	4.71
SRT11-145	pirrotita	-6.60	SRT1-2	pirita	4.87
IQ-01	py+cpy+cs	-0.04	SRT1-2	pirrotita	4.95
IQ-01	pirita	2.38	SRT-10-95	pirita	5.20
FQ112-34(2)	calcopirita	2.25	SRT3	pirita	5.38
FQ112-34(2)	calcopirita	2.56	SRT3	pirita	5.72
FQ112-34(2)	calcopirita	2.74	SRT2-97	pirita	6.30
FQ112-34(2)	calcopirita	2.85	SRT2-97	pirita	6.47
FQ112-34(2)	pirita	4.70	SRT2-97	pirita	7.05
FQ112-34(2)	pirita	5.19	SRT2-97	pirita	7.36
FQ112-34(2)	pirita	6.62	F-01 (1-A)	pirita	7.58
FQ112-3A	galena	1.03			
FQ112-3A	pirita	2.90			
FQ112-3A	calcopirita	3.63			

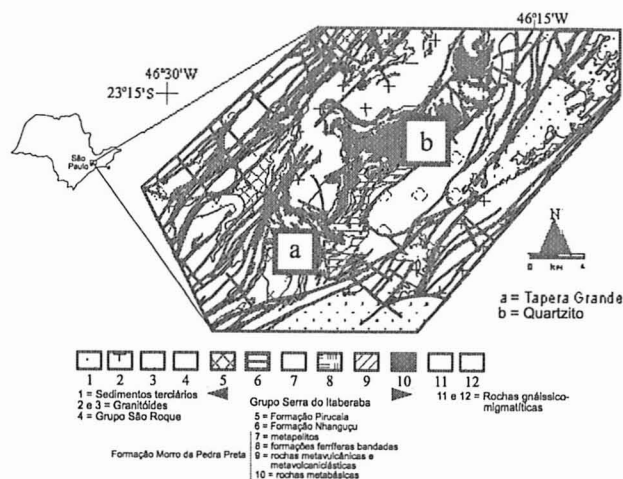


FIGURA 1 - Mapa simplificado dos grupos Serra do Itaberaba e São Roque (in: Juliani 1993, mod.)

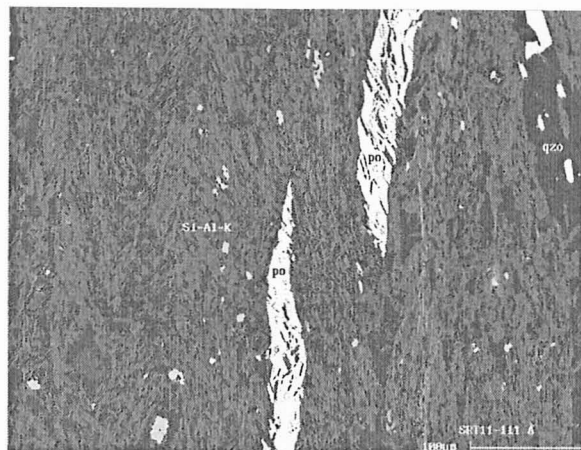


FIGURA 2 - Pirrotita (po) do Estágio I em grafita xisto. Área Tapera Grande, amostra SRT11-111. MEV, elétrons retospalhados.

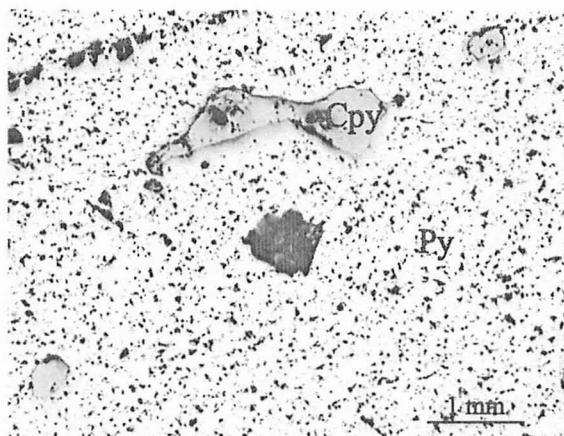


FIGURA 3 - Pirita (Py) de aspecto poroso do Estágio II e calcopirita (Cpy) do Estágio III. Área Quartzito, amostra FQ112-34. Luz refletida, plano-polarizada.

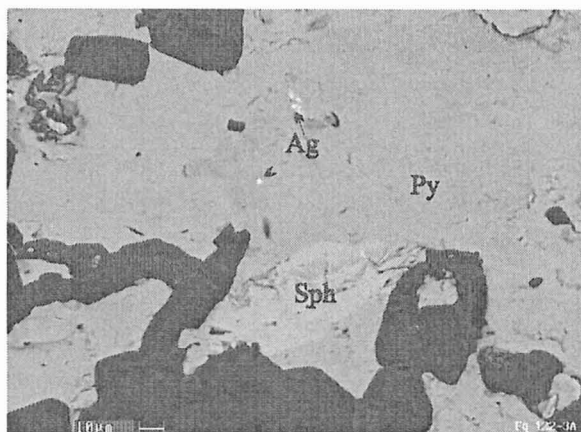


FIGURA 4 - Prata nativa (Ag) e esfalerita de Zn-Cd (Sph) do Estágio IV. Área Quartzito, amostra FQ112-3A. MEV, elétrons retospalhados.

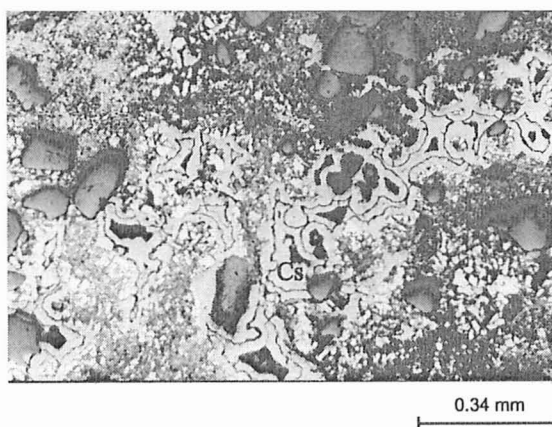


FIGURA 5 - Sulfetos de cobre (Cs) formados por alteração supergênica de calcopirita. Área Quartzito, amostra IQ-01. Luz refletida, plano-polarizada.

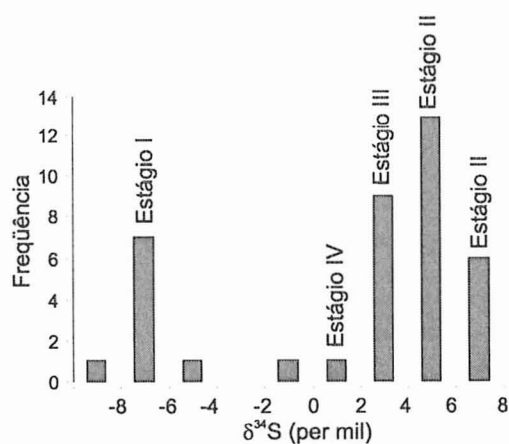


FIGURA 6 - Histograma dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ apresentados na Tabela 1.