

# A EVOLUÇÃO PALEOHIDROLÓGICA DA ZONA MINERALIZADA DO CORPO IV, ESTRUTURA IV DO *GREENSTONE BELT* DE CRIXÁS, GOIÁS

KLAUS PETERSEN<sup>1</sup>, STEFFEN HAGEMANN<sup>2</sup>, CAETANO JULIANI<sup>3</sup> & ROSA M. BELLO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> [kjpeters@cyllene.uwa.edu.au](mailto:kjpeters@cyllene.uwa.edu.au), <sup>2</sup> [shageman@cyllene.uwa.edu.au](mailto:shageman@cyllene.uwa.edu.au), School of Earth & Geographical Sciences, The University of Western Australia, 35 Stirling Highway, Crawley WA 6907, Australia.

<sup>3</sup> [cjuliani@usp.br](mailto:cjuliani@usp.br), <sup>4</sup> [rosabell@usp.br](mailto:rosabell@usp.br), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, Butantã, São Paulo, SP 05508-080

## RESUMO

A análise estrutural do Corpo IV resultou na caracterização de 3 sistemas de veios hidrotermais associados a um evento pré-neoproterozóico e dois interpretados como pertencentes ao neoproterozóico (ciclo Brasileiro). A cuidadosa amostragem aliada ao estudo petrográfico detalhado forneceu resultados coerentes para as associações de inclusões fluidas preservadas do evento neoproterozóico. A integração dos dados microtermométricos e de dados geotermobarométricos da alteração mineral relacionada à mineralização do Corpo IV permitiu a definição de um campo de condições da mineralização. Os resultados são coerentes com a fácies xisto verde superior a anfibolito, com temperaturas de 428 a 580°C e pressões de 5,7 a 8,4 kbar. A microtermometria das inclusões fluidas forneceu salinidades entre 3-11 % em peso de NaCl equivalente e densidade total ao redor de 1 g/cm<sup>3</sup>.

## INTRODUÇÃO

O *greenstone belt* de Crixás representa uma das áreas clássicas de mineralização de ouro neste tipo de rocha no Brasil, tendo sido amplamente abordado em teses e publicações. A exposição recente por meio de galerias de exploração da zona mineralizada denominada Corpo IV, trouxe a oportunidade de descrever uma nova ocorrência de ouro, aproximadamente 600 metros a oeste da Mina III, a ocorrência principal. Inicialmente, foi realizada uma análise estrutural, com ênfase na cronologia relativa das estruturas relacionadas ao Corpo IV. Esta análise permitiu definir zonas preservadas e representativas dos diversos eventos que acometeram esses pacotes de rochas, sendo que essas zonas foram amostradas, petrograficamente analisadas e submetidas a microtermometria de inclusões fluidas na tentativa de determinar os principais fluidos e condições de pressão e temperatura relativos a cada evento.

## GEOLOGIA REGIONAL

A Província Tocantins localiza-se na parte central do Brasil e representa parte do grande orógeno Brasileiro/Pan-Africano o qual se formou entre os três maiores blocos continentais: o Amazônico, o São Francisco/Congo e o Parapanema. A província compreende três importantes cinturões de dobramentos supracrustais conhecidos como Araguaia, Paraguai e Brasília. O cinturão de dobramentos Brasília se estende por 1100 km do oeste de Minas Gerais, através de Goiás, até o sudoeste do estado de Tocantins. Este cinturão constitui provavelmente uma das mais bem preservadas faixas orogênicas neoproterozóicas no Brasil, onde são encontrados evidências de *mélanges* ofiolíticas, rochas de arco de afinidade cálcio-alcálica, granitos colisionais do tipo S e estruturas de *nappes* em escala regional, que indicam o transporte tectônico em direção ao oeste. Internamente ao cinturão de dobramentos Brasília situam-se os terrenos arqueanos de Goiás (Cordani *et al.*, 2000).

O conjunto de terrenos arqueanos de Goiás (grupos Crixás, Pilar de Goiás, Guarinos ao norte e Goiás Velho, Faina ao sul) são constituídos de *greenstone belts* rodeados por típicos granitos TTG, separados ao norte das rochas neoproterozóicas da Sequência Santa Terezinha pertencentes ao Arco Magmático de Goiás pela falha de baixo ângulo Mandinópolis (Jost *et al.*, 2001). Ao sul e a leste, as rochas arqueanas estão em contato tectônico com as unidades metassedimentares e metavulcânicas proterozóicas do cinturão de dobramentos Brasília, e a oeste com rochas do cinturão de dobramentos Araguaia (Fortes *et al.*, 2003).

Ao norte dos terrenos arqueanos de Goiás ocorre o Grupo Crixás delimitado ao norte pela sequência Santa Terezinha, a oeste pelos granitos Caiamar e a leste pelos granitos Anta. O Grupo Crixás é descrito como sendo uma sequência invertida (Theodoro, 1995), onde os metakomatítos da Formação Córrego Alagadinho e as metabásicas da Formação Rio Vermelho estão posicionadas sobre os metassedimentos da Formação Ribeirão das Antas (Jost & Oliveira, 1991). A Formação Ribeirão das Antas hospeda em sua base a mineralização do Corpo IV e apresenta frequentemente um contato gradacional na base com as rochas metabásicas da Formação Córrego Vermelho, sendo composto de cerca de 250 m de xistos carbonosos intercalados com rochas metabásicas e dolomíticas e, aproximadamente 150 m de metaritimitos no topo (Jost & Fortes, 2001).

## EVOLUÇÃO ESTRUTURAL

As mais recentes investigações estruturais indicam que pelo menos quatro grandes eventos acometeram as rochas do Grupo Crixás (Jost & Fortes, 2001).

O evento arqueano D1 gerou a primeira foliação  $S_1$  que, devido às perturbações sofridas pelo posicionamento dos corpos graníticos, é tido com anterior a estes. O Evento D2, ainda no arqueano, é caracterizado pelo posicionamento dos corpos graníticos Anta e Caiamar. O Evento D3 é marcado pela reorientação de  $S_0$  e  $S_1$ , desenvolvimento de falhas de empurrão, *sheath faults*, lineações minerais e de estiramento ( $L_{m/e3}$ ) e atividade magmática. Este evento é, até o momento, reconhecido apenas nos terrenos arqueanos, podendo tratar-se de uma continuação do evento D2, sendo atribuídas ao mesmo idades paleoproterozóicas por meio de datações U-Pb SHRIMP e Pb-Pb (Jost & Fortes, 2001). Estima-se que a sedimentação no cinturão de dobramentos Brasileiro tenha se iniciado a aproximadamente 1,0 Ga e que a sua deformação (D4) tenha se dado entre 0,7 e 0,5 Ga.

## **GEOLOGIA DO CORPO IV DO GREENSTONE BELT DE CRIXÁS**

O Corpo IV ocorre na forma de lentes descontínuas com mergulhos suaves de  $20^\circ$  e direção de  $30-35^\circ$ NW, que na galeria de exploração do nível 250 chega a 120 m de extensão segundo NW e poucos metros de espessura. Este corpo mineralizado está hospedado na base dos metassedimentos carbonosos da Formação Ribeirão das Antas, a poucos metros, ou no contato com as rochas metabásicas da Formação Rio Vermelho. As rochas hospedeiras se limitam basicamente a xistos carbonosos e *metawackes* carbonosas, e o Corpo IV pode ser reconhecido pelo relativo aumento na intensidade de veios de quartzo de diversas gerações. O ouro ocorre na forma de diminutos flocos com 5 a 20  $\mu$ m disseminado na rocha e raramente como cristais eudíricos quando em meio a delgados ( $< 1$  cm) veios de quartzo. Pirrotita é o principal sulfeto associado intimamente com ouro, sendo que calcopirita e arsenopirita são acessórios secundários. A ocorrência de pirrotita, assim como do ouro, é controlada pela lineação mineral e de estiramento  $L_{m/e3}$  (Petersen, 2003).

Foram constatados dois sistemas sobrepostos de falhas que obliteram o Corpo IV, sendo que o último evento gera estruturas “S-C” que refletem a geometria do corpo mineralizado (evento neoproterozóico?). O evento de falha anterior (pré-neoproterozóico) está relacionado à  $L_{m/e3}$  ( $N37^\circ$ W/ $20^\circ$ ) e reflete a mesma direção/mergulho do *plunge* do corpo de minério. Datações de Sm-Nd recentes demonstraram que a parte superior da Formação Ribeirão das Antas hospeda mineralizações proterozóicas, mas deixa em aberto a parte inferior, que pode ser até arqueana, devido a dificuldade de se encontrarem minerais passíveis de serem submetidos a datação nesta parte do sistema (Fortes *et al.*, 2003). Em algumas partes das exposições de rocha nas paredes das galerias foi possível distinguir porções do xisto carbonoso fortemente deformadas pelo último evento de outras partes menos afetadas por este, com zonas de cisalhamento anteriores, além de dobras, foliações e lineações minerais e de estiramento ( $L_{m/e3}$ ) preservadas. Estes bolsões preservados normalmente refletem os teores mais altos, segundo análises em amostras de canal realizados pela mineradora. Foram ainda reconhecidos padrões de alterações com halos aproximadamente concêntricos, sendo que a alteração interpretada como diretamente relacionada à mineralização é composta da associação sericita + albita + quartzo + biotita  $\pm$  dolomita ferrosa  $\pm$  granada + pirrotita  $\pm$  ouro  $\pm$  arsenopirita (Petersen, 2003).

## **PETROGRAFIA DOS VEIOS DE QUARTZO E MINERAIS RELACIONADOS**

A amostragem dos veios de quartzo permitiu a distinção de 5 gerações, sendo que as três primeiras são interpretados como pertencentes aos eventos D2 (tardio) e/ou ao D3 (V2/3A, V2/3B e V2/3C) e as duas últimas ao evento D4 (V4A, V4B), detalhados em ordem cronológica a seguir:

- (a) V2/3A – apresenta coloração escura devido à presença de matéria carbonosa, desenvolveu-se principalmente em *tension gashes*, apresenta-se dobrado, tem de 1-5 cm de espessura e apresenta turmalina como acessório;
- (b) V2/3B – preenche a lineação mineral e de estiramento ( $L_{m/e3}$ ), apresenta aproximadamente 1-3 mm de espessura, e pirrotita e ouro como acessórios (Figura 1);
- (c) V2/3B – veios leitosos a hialinos que desenvolveram-se nos planos “C” das estruturas “S/C” segundo a foliação milonítica  $S_{m3}$ , ocorrem às vezes boudinados, apresentam espessuras de até 10 cm, com pirrotita e ouro como acessórios particularmente próximo aos contatos dos veios (zonas de “descarga” da  $L_{m/e3}$  nas fraturas conforme a Figura 1);
- (d) V4A – relacionado à falhas subverticais e ao evento transpressivo (N-S), com 2-10 cm de espessura;
- (e) V4B – frequentemente hialino, desenvolveu-se sobre o plano “C” das estruturas “S/C” ( $S_{m4}$ ), apresentam-se estirados e com dobras intrafoliais, tem de 2 a 20 cm de espessura e contém cristais euhédricos de siderita.

O quartzo dos veios V2/3A é interpretado como sendo a geração mais antiga preservada no Corpo IV, sendo que sua ocorrência é limitada ao núcleo de blocos preservados do evento neoproterozóico. A geração de quartzo associada com pirrotita e ouro na  $L_{m/e3}$  indica que esta foi o conduto da disseminação dos fluidos mineralizantes dentro do pacote de xistos carbonosos. Estas lineações são às vezes truncadas por fraturas preenchidas com quartzo (V2/3A e/ou V2/3C) onde ocorrem texturas sugerindo a contemporaneidade do sistema de veios (Figura 1). Tais texturas indicam ainda que a entrada dos fluidos oriundos dos condutos da  $L_{m/e3}$ , promovem a precipitação de pirrotita e, mais raramente, de ouro. Em algumas vezes, foram observadas situações em que grãos de ouro, provavelmente provenientes dos condutos da  $L_{m/e3}$ , formam cristais eudíricos dentro do quartzo.

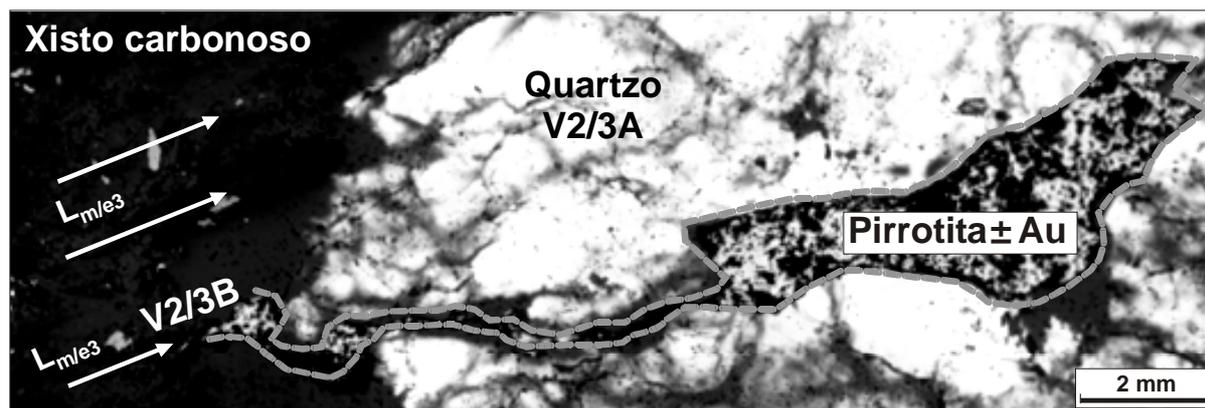


Figura 1 - Fotomicrografia mostrando o contato do xisto carbonoso com veio de quartzo da geração V2/3A. A associação quartzo + pirrotita ± ouro do veio V2/3B, controlada pela lineação mineral e de estiramento ( $L_{m/e3}$ ), é "injetada" no veio de quartzo.

### INCLUSÕES FLUIDAS E MICROTERMOMETRIA NOS VEIOS E MINERAIS DO CORPO IV

As amostras foram coletadas em pontos representativos, internamente e externamente ao Corpo IV, das exposições nas paredes das galerias de desenvolvimento (nível 250) e dos testemunhos de sondagem. Foram confeccionadas 20 lâminas polidas em ambos os lados, das quais foram selecionadas 7 para análises microtermométricas de cerca de 400 inclusões fluidas.

A petrografia detalhada das amostras dos veios de quartzo resultou na caracterização dos tipos composicionais das diversas associações de inclusões fluidas em relação à cronologia relativa dos veios e das inclusões fluidas. Após caracterização das associações de inclusões fluidas representativas de cada evento, as mesmas foram submetidas à análise microtermométrica, sendo o resumo dos resultados apresentado na Tabela 1. Os resultados microtermométricos não apresentaram variações em função das dimensões das inclusões, podendo-se, portanto, presumir que durante a formação das mesmas não houve uma influência diferencial sobre a composição local e a densidade dos fluidos no veio, por meio de qualquer efeito físico-químico dependente de área superficial (Diamond, 1990).

Tabela 1 - Tipos composicionais, associações de inclusões fluidas de acordo com a cronologia relativa e resumo dos resultados microtermométricos do Corpo IV. Abreviações: P = primária, PS = pseudo-secundária, S = secundária, IF = inclusão fluida, % NaCl = % em peso de NaCl equivalente.

	V2/3A	V2/3B	V2/3C	V4A	V4B
<b>P</b>	• carbônica-CH <sub>4</sub>	• aquo-carbônica	• aquo-carbônica	• carbônica • aquo-carbônica	• carbônica • aquo-carbônica
<b>PS</b>	• carbônica-CH <sub>4</sub> • aquo-carbônica	-	• aquo-carbônica	• aquo-carbônica	• aquo-carbônica
<b>S</b>	• carbônica-CH <sub>4</sub> + aquosa • carbônica-CH <sub>4</sub> + aquo-carbônica + CH <sub>4</sub> * • aquo-carbônica	-	• aquo-carbônica	• carbônica + aquo-carbônica • aquo-carbônica • monofásica não identificada	• carbônica + aquo-carbônica* • monofásica não identificada
<b>Obs.</b>	IF's aquo-carbônicas com cristais de saturação, *=zonas prováveis de imiscibilidade	$L_{m/e3}$ preenchido com a associação mineral quartzo + pirrotita ± ouro.	IF's interpretadas como sendo contemporâneas aos eventos hidrotermais responsáveis pelo transporte de ouro e sulfetos.	IF's aquo-carbônicas frequentemente com cristais de saturação, IF's monofásicas relacionadas às falhas tardias (D4 ou posterior)	IF's aquo-carbônicas com cristais de saturação, *=zonas de imiscibilidade, IF's monofásicas relacionadas às falhas tardias (D4 ou posterior)
<b>RESUMO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE MICROTERMOMÉTRICA PARA INCLUSÕES PRIMÁRIAS E PSEUDO-SECUNDÁRIAS</b>					
	Th <sub>tot</sub> =236,8-276,4°C P=1,9-3,3 kbar d <sub>tot</sub> =1,07-1,12 g/cm <sup>3</sup> 14-35 % NaCl	Th <sub>tot</sub> =299,2-305,9°C P=3,5-4,0 kbar d <sub>tot</sub> =0,976 g/cm <sup>3</sup> 3-4 % NaCl	Th <sub>tot</sub> =311,9-412,0°C P=3,3-5,6 kbar d <sub>tot</sub> =1,01-1,05 g/cm <sup>3</sup> 8-11 % NaCl	d <sub>tot</sub> =0,86-0,94 g/cm <sup>3</sup> 1,44 % NaCl	Th <sub>tot</sub> =316,9-370,5°C d <sub>tot</sub> =0,70-0,74 g/cm <sup>3</sup> 0-7 % NaCl

### EVOLUÇÃO P-T-X-T DOS FLUIDOS HIDROTERMAIS NO CORPO IV

Nos fluidos das cinco gerações dos veios as propriedades são contrastantes, sendo que nos veios V2/3A estão inclusões fluidas aquo-carbônicas de salinidades médias, com frações molares de CO<sub>2</sub> sempre acima de 0,2, com exceção daquelas aprisionadas em zonas de imiscibilidade ou de misturas, sempre com salinidades elevadas. As inclusões fluidas dos veios V2/3C mostraram uma grande pureza em água (XH<sub>2</sub>O acima de 0,89) e

as mais baixas salinidades em relação às presentes nos diversos sistemas de veios hidrotermais, com uma correlação quase idêntica ao fluido das inclusões contidas no quartzo do veio V2/3B que utiliza como conduto a lineação mineral e de estiramento  $L_{m/e3}$ . O veio V4A e V4B, por sua vez, apresentam inclusões com frações molares de  $CO_2$  maiores que V2/3C, de maneira semelhante aos fluidos de V2/3A, mas com  $XCO_2 < 0,63$ .

Isso relaciona a mineralização de sulfetos e ouro a um sistema com fluidos hidrotermais relativamente mais aquosos e de baixa/média salinidade, em acordo com os fluidos relacionados a outras mineralizações em *greenstonebelts* arqueanos.

Os resultados geotermobarométricos indicaram, para o par granada-biotita do núcleo das alterações hidrotermais diretamente relacionadas à mineralização, que as temperaturas são compatíveis com as da fácies xisto verde, em seu limite superior ou início da fácies anfíbolito. A integração da área de estabilidade determinada pela geotermobarometria sobre o diagrama de isócoras resulta num campo de intersecções que deve representar as condições de formação dos minerais durante a mineralização do Corpo IV, conforme a Figura 2.

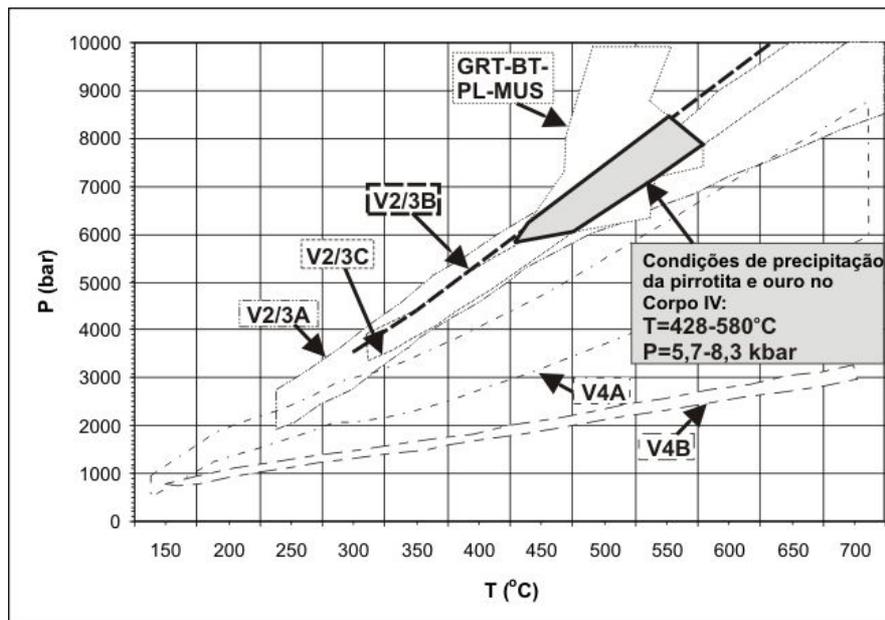


Figura 2 - Diagrama dos campos totais de isócoras representativas das diversas gerações de veios hidrotermais mais o campo de estabilidade dos minerais da alteração hidrotermal relacionada à mineralização no Corpo IV.

#### Agradecimentos

FAPESP (99/03045-6) e MINERAÇÃO SERRA GRANDE pelo apoio financeiro e logístico. Aos laboratórios de inclusões fluidas do Instituto de Geociências – USP e do Global Center for Metallogeny – University of Western Australia. R.M.S. Bello agradece ao CNPq (303872/85).

#### Referências

- CORDANI U.G., MILANI E.J., CAMPOS D.A. (edit.) (2000) *Tectonic Evolution of South America*. 31st International Congress, Rio de Janeiro, 856p.
- DIAMOND, L.D. (1990) Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val D'Ayas, Northwest Italian Alps. *American Journal of Science*, 290:912-958.
- FORTES, P. DE T. F. D. O., PIMENTEL, M. P., SANTOS, R. V., JUNGES, S. L. (2003) Sm–Nd studies at Mina III gold deposit, Crixás greenstone belt, central Brazil: implications for the depositional age of the upper metasedimentary rocks and associated Au mineralization. *Journal of South American Earth Sciences* 16, 503–512
- JOST, H.; FORTES, P. T. F. E. (2001) Gold deposits and occurrences of the Crixás Goldfield, central Brazil. *Mineralium Deposita*. 36:358-376.
- JOST, H.; OLIVEIRA, A. M. (1991) Stratigraphy of the greenstone belts, Crixás Region, Goiás, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 4(3):201-214.
- PETERSEN JR., K.J. (2003) Estudo das mineralizações auríferas dos Corpos IV e V da estrutura IV do *Greenstone Belt* de Crixás (GO). Tese de Doutorado, IG-USP, 195p.
- THEODORO S.M.C.H. (1995) Ambiente de sedimentação da Formação Ribeirão das Antas, Grupo Crixás - Goiás. Brasília, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Brasília, 88p.