

## OCORRÊNCIA DE FERROPIROSMALITA NAS BRECHAS MINERALIZADAS DO DEPÓSITO DE Au-Cu-(±ETR-U) DE IGARAPÉ BAHIA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

EDISON TAZAVA\*, CLAUDINEI GOUVEIA DE OLIVEIRA\*\* & NEWTON SOUZA GOMES\*

**ABSTRACT** OCCURRENCE OF FERROPYROSMALITE IN THE MINERALIZED BRECCIAS FROM IGARAPÉ BAHIA Au-Cu-(±REE-U) DEPOSIT, CARAJÁS MINERAL PROVINCE In the last years, several works report the presence of pyrosmalite mineral series  $[(Fe,Mn)_8Si_6O_{15}(OH,Cl)_{10}]$  commonly associated with volcanic exhalative massive sulphide or Fe-Mn metamorphosed deposits. In this paper, we present the inedit occurrence of ferropyrosmalite in the Au-Cu (+REE-U) of Igarapé Bahia deposit, located in the Au-Cu district of the Carajás Mineral Province. We consider the Igarapé Bahia mineralization as being related to the genesis of iron-oxide class deposit, like the Olympic Dam type. Ferropyrosmalite occurs in two different contexts: i) associated with carbonate veins; ii) associated with heterolithic breccias, composed by BIF and mafic metavolcanic fragments imersed in a magnetite, chalcopyrite, bornite, pyrite, carbonates (calcite to siderite), uranium and REE minerals, and gold, -rich matrix. The growth of ferropyrosmalite is probably due to the substitution of iron rich minerals (chlorite, magnetite and siderite), controlled by magmatic fluid influx rich in chlorine. The permeability of breccias and the discontinuity of veins favour fluid percolation. The mode of occurrence of ferropyrosmalite and its relation with amphibole (ferro-hornblende-actinolite) indicate metasomatic growth of the former under temperatures in the transition of greenschist/amphibolite facies. The ferropyrosmalite of the Igarapé Bahia deposit represents an uncommon type of occurrence linked to hydrothermal/magmatic conditions.

**Keywords:** Carajás Mineral Province, Igarapé Bahia deposit, Au-Cu-REE-U mineralization, ferropyrosmalite.

**RESUMO** Nos últimos anos, diversos trabalhos têm reportado a presença de minerais da série da pirosmalita  $[(Fe,Mn)_8Si_6O_{15}(OH,Cl)_{10}]$  em depósitos de sulfetos maciços vulcano-exalativos e depósitos de Fe-Mn metamorfizados. Neste trabalho, apresentamos uma descrição inédita da ferropirosmalita no depósito de Au-Cu-(±ETR-U) de Igarapé Bahia, localizado no distrito auro-cuprífero da Província Mineral de Carajás. Admite-se que esse depósito foi gerado por processos similares àqueles envolvidos na gênese dos depósitos da classe óxidos de ferro-(Au-Cu-U-ETR) do tipo Olympic Dam. A ferropirosmalita descrita ocorre sob dois contextos: i) associada a veios e vênulas carbonáticas; e ii) associada a brechas heterolíticas compostas por fragmentos de formação ferrífera bandada, metavulcânicas básicas e matriz rica em magnetita, calcopirita, bornita, piritita, siderita, minerais ricos em urânio e elementos terras raras, anfibólio, stülpnomelana, clorita e quartzo. O crescimento da ferropirosmalita teria envolvido a substituição de minerais ricos em ferro (clorita, magnetita e siderita), controlado pela introdução de fluidos magmáticos ricos em cloro. A percolação dos fluidos foi induzida pela permeabilidade elevada das brechas e também pela descontinuidade ao longo das paredes de vênulas carbonáticas. O modo de ocorrência da ferropirosmalita e o seu crescimento em equilíbrio com anfibólio (ferro-hornblenda actinolítica) são sugestivos de crescimento metamórfico para o mineral, supostamente sob condições térmicas na transição das fácies xisto verde/amfibolito. A ferropirosmalita descrita no depósito de Au-Cu-(±ETR-U) de Igarapé Bahia representa assim um exemplo pouco comum da formação desse mineral sob condição hidrotermal/magmática.

**Palavras-chave:** Província Mineral de Carajás, depósito Igarapé Bahia, mineralização de Au-Cu-ETR-U, ferropirosmalita.

**INTRODUÇÃO** A pirosmalita foi originalmente definida por Zambonini (1901, in Vaughan 1986) como uma espécie mineral simples, com quantidades aproximadamente iguais de Fe e Mn. Fron-del & Bauer (1953) propuseram o nome pirosmalita para os casos em que Fe > Mn e manganopirosmalita para Mn > Fe. Atualmente, o termo pirosmalita refere-se a série de minerais da solução sólida  $[(Mn,Fe)_8Si_6O_{15}(OH,Cl)_{10}]$  com os membros finais manganopirosmalita e ferropirosmalita (Vaughan 1987).

A estrutura cristaloquímica dos membros do grupo da pirosmalita, como resumido por Kato & Takéuchi (1983), é construída de camadas octaédricas tipo brucita, alternando com camadas tetraédricas  $Si_6O_{15}$ .

Pan *et al.* (1993) descreveram os minerais da série da pirosmalita em três depósitos de sulfetos maciços do Pré-Cambriano do Canadá, salientando que os minerais dessa série têm sido encontrados com maior frequência em depósitos de sulfetos polimetálicos ou de ferro-manganês metamorfizados e, mais raramente, associado a estágios tardios de alteração hidrotermal. Na Tabela 1, encontram-se relacionadas as principais ocorrências dos minerais da série da pirosmalita.

Neste trabalho, são apresentadas informações sobre o modo de ocorrência e o significado genético da ferropirosmalita no depósito de Au-Cu-(±ETR-U) de Igarapé Bahia, o qual admite-se ter sido gerado por processos similares aos envolvidos na gênese dos depósitos da classe óxidos de ferro-(Au-Cu-U-ETR) ou mais especificamente tipo Olympic Dam (Tazava 1999). Para esses depósitos, a mineralização de Cu-Au está associada à contribuição de fluidos magmáticos associados a intrusões alcalinas.

**GEOLOGIA DO DEPÓSITO IGARAPÉ BAHIA** O depósito de Au-Cu-(±ETR-U) de Igarapé Bahia está localizado na Província Mineral de Carajás, sudeste do Cráton Amazônico, no contexto do Grupo Igarapé Bahia, unidade superior do Supergrupo Itacaiúnas (Docegeo 1988) (Fig. 1). Este depósito contém 23,4 Mt de minério aurífero com teor de 2,90 g/t, com produção em 1997 de 10 toneladas de ouro. Informações sobre as reservas de Cu, U e ETR não são disponíveis.

As rochas do Grupo Igarapé Bahia são divididas em duas unidades: a Formação Grota do Vizinho (basal), a qual corresponde a um pacote

metavulcanossedimentar de baixo grau metamórfico ( fácies xisto verde), representado por metavulcânicas, metapiroclásticas, formações ferríferas, e metassedimentares detriticas finas (metarritmitos); e a Formação Sumidouro (topo), essencialmente sedimentar, constituída por um conjunto de metarenitos (Docegeo 1988). Em superfície, essas rochas encontram-se intensamente alteradas devido ao intemperismo e formam uma espessa sequência laterítica enriquecida em ouro e que, atualmente, se encontra em exploração. Marginalizando essa sequência, afloram os arenitos do Grupo Rio Fresco (Docegeo 1988), também enquadrados na Formação Aguas Claras (Araújo *et al.* 1991).

A sequência metavulcanossedimentar de Igarapé Bahia está estruturada segundo a direção NNW, com mergulho médio de aproximadamente 70° para NE, e aflora de maneira restrita na Serra de Carajás, ou seja, na área de abrangência da própria mina de Igarapé Bahia.

Os domínios mineralizados são representados por uma grande variedade de brechas heterolíticas (Fig.2), compostas por fragmentos de rochas encaixantes e matriz hidrotermal, caracterizada por sulfetos (calcopirita-bornita-piritita-molibdenita), óxido de ferro (magnetita), carbonatos (calcita-siderita), fluorita, ouro, minerais ricos em urânio e elementos terras raras (Tazava 1999, Tallarico *et al.* 1998).

Datações geocronológicas obtidas pelo método Rb/Sr por Ferreira Filho (1985) indicam idades de 2350 Ma (R.I.=0,715) em piroclásticas silicosas e 2577 ± 72 Ma (R.I.=0,702) em granófiros básicos. O mesmo autor obteve pelo método K-Ar em anfibólios idade próxima, 2270 ± 50 Ma. Mougeot *et al.* (1996), utilizando os métodos U-Pb e Pb-Pb em análises de sulfetos (calcopirita, piritita, galena e molibdenita), encontraram para a mineralização de Au e Cu da Mina de Igarapé Bahia idade de 2850 ± 65 Ma, porém esses mesmos autores obtiveram idades de remobilização da mineralização arqueana em 2060 Ma e 1800 Ma.

As primeiras sugestões de modelo genético para o depósito de Au-Cu de Igarapé Bahia foram feitas por Ferreira Filho (1985) e Ferreira Filho & Danni (1985), que interpretaram as mineralizações como do tipo *stringer ore* e formadas de acordo com o processo clássico que envolve os depósitos vulcano-exalativos. Ribeiro (1989) discute a possibilidade da participação de soluções relacionadas a corpos graníticos pós-orogênicos na geração da mineralização. Para

\* Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro, Ouro Preto, MG, 35400-000, Brasil, e-mail: tazava@degeo.ufop.br

\*\* Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70910-900, Brasil, e-mail: gouveia@unb.br

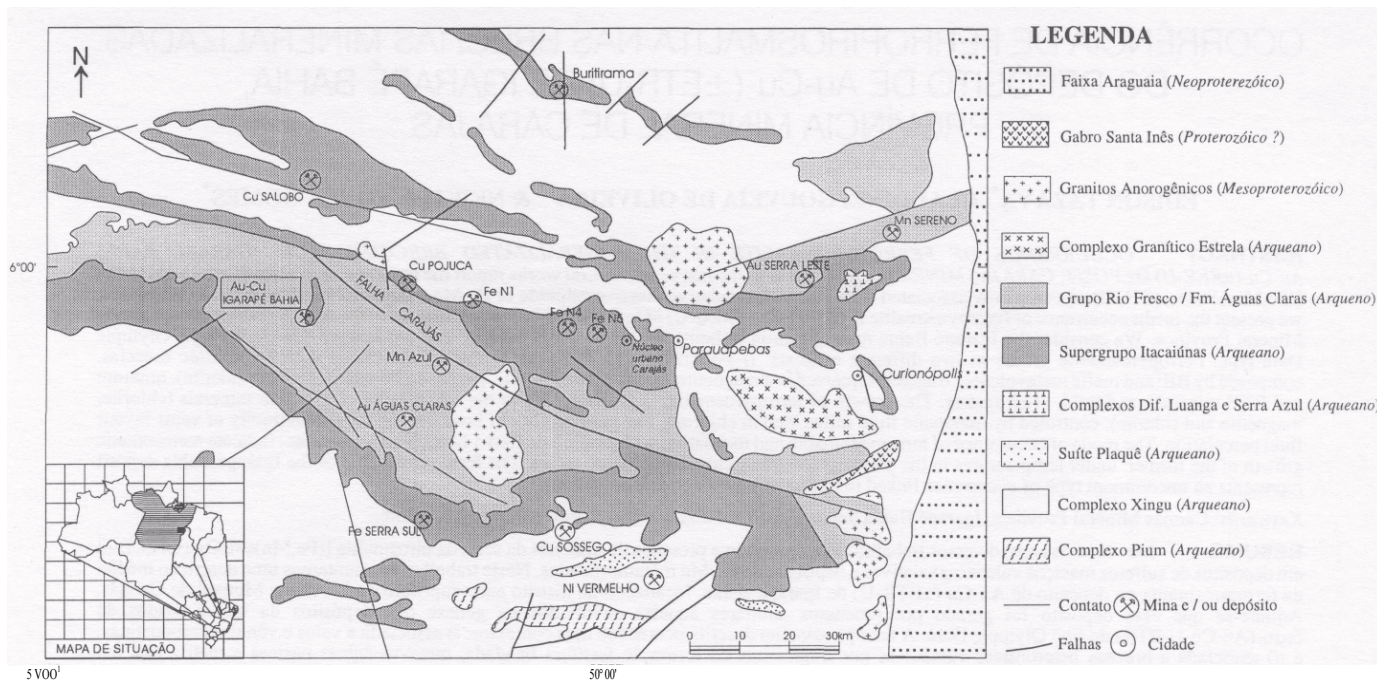


Figura 1 - Mapa geológico simplificado da porção norte da região de Carajás (modificado de Docego 1988 e Barros et al. 1997).

Sachs (1993), dois tipos principais de mineralização se destacam: uma estratiforme vulcano-exalativo; e outra formada devido a eventos hidrotermais superpostos. Althoff *et al.* (1994) concluíram que o estilo de mineralização não se enquadra em nenhum modelo clássico de deposição de sulfetos, propondo assim um modelo, em que a mineralização teria sido resultante da circulação da água do mar em resposta à dissipação de energia termal das rochas vulcânicas, sendo o cobre e o ferro lixiviados e reprecipitados na forma de sulfetos contendo Au, cujos locais mais favoráveis foram os veios hidrotermais.

Recentemente, Huhn (1996) e Huhn & Nascimento (1997) sugerem que o depósito de Igarapé Bahia se insere na classe de óxidos de ferro (Cu-U-Au-ETR) proposta por Hitzman *et al.* (1992). Essa hipótese foi corroborada por Tallarico *et al.* (1998) e Tazava (1999), que, além disso, mostraram que o depósito de Igarapé Bahia possui algumas similaridades com o depósito Olympic Dam, sul da Austrália, tais como: o caráter hidrotermal das brechas mineralizadas; a presença de halos de alteração hidrotermal dos tipos cloritização, carbonatação, potassificação, sulfetação e Fe-metassomatismo; e o enriquecimento em cobre, ouro, prata, urânio, elementos terras raras, flúor, boro, fósforo, molibdênio. Oliveira *et al.* (1998), pelo estudo da composição isotópica de C e O em carbonato, em associação com dados de inclusões fluidas apresentadas por Althoff *et al.* (1994), mostram que existem evidências de mistura de fluidos na gênese do depósito de Igarapé Bahia. Essa mistura envolveria fluidos magmáticos com salinidade e temperaturas mais elevadas e fluidos superficiais de salinidade e temperatura inferiores, o que também é análogo ao modelo proposto por Haynes *et al.* (1995) para o depósito de Olympic Dam.

**CARACTERIZAÇÃO DA FERROPIROSMALITA** Em seções delgadas, a ferropirosmalita ocorre como cristais euédricos e subédricos incolores, uniaxiais negativos, com forte birrefringência e clivagem basal perfeita. A caracterização química da ferropirosmalita foi obtida utilizando-se de análises pontuais por microsonda eletrônica na Universidade de Brasília.

A ferropirosmalita foi encontrada no depósito de Igarapé Bahia sob dois contextos: *i*) associada a veios e vênulas em rocha hidrotermalizada carbonática, composta de carbonato, magnetita, calcopirita e traços de pirita e turmalina, sob a forma de cristais subédricos a euédricos e tamanhos que variam de 0,05 a 0,3mm (Figs. 3A e 3B); e *ii*) associada a brechas heterolíticas compostas por fragmentos centimétricos de formação ferrífera bandada e de rochas metavulcânicas, com matriz rica em calcopirita, bornita, magnetita, clorita, anfibólio (ferro-hornblenda actinolítica) e, secundariamente, stilpnomelana, quartzo e minerais ricos em urânio e ETR. Nesta rocha, a ferropirosmalita ocorre marginando os fragmentos de formação ferrífera bandada, no interior dos fragmentos de rochas metavulcânicas (Figs. 3C e 3D), e mais raramente dispersos na matriz. Os cristais são subédricos e tamanhos variáveis (0,02 a 0,5mm). Em ambos contextos é evidente

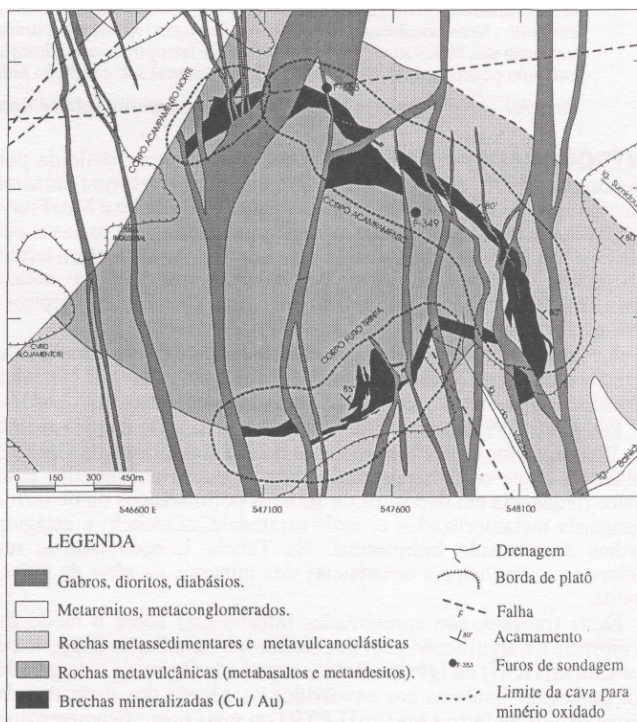


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Mina de Igarapé Bahia (modificado de Soares et al. 1999).

que a ferropirosmalita substitui minerais ricos em ferro (magnetita, siderita, clorita) da matriz e dos fragmentos e em equilíbrio de crescimento com ferro-hornblenda-actinolítica e calcopirita.

Dados sobre a composição química dos minerais da série da pirosmalita, reportados na literatura, apresentam, na sua maioria, a relação Mn/(Fe+Mn) entre 0,41 a 0,85 (Tabela 1). Na pirosmalita do depósito Igarapé Bahia esta relação varia de 0,03 a 0,08 (Tabela 2), que é muito próxima do membro final ferropirosmalita descrita por Vaughan (1986). Em todos os cristais analisados, o cloro está presente com teores que oscilam entre 2,77 e 5,38 % peso.

**DISCUSSÕES E CONCLUSÕES** Embora não existam dados para avaliação da estabilidade da pirosmalita, Pan *et al.* (1993) realizaram estimativas termodinâmicas a partir de análises de paragêneses

minerais e calcularam para os depósitos estudados uma ampla variação de temperatura para formação dos minerais da série, variando de 240 a 650°C. Dong & Pollard (1997) descrevem ferropirosmalita em inclusões fluidas polifásicas do depósito de Ag-Pb-Zn de Cannington,

Cloncurry District, Austrália e, com o contínuo aquecimento, verificaram a completa dissolução desta a temperaturas entre 430 e 505°C. O alto conteúdo de cloro dos minerais da série da pirosmalita tem chamado a atenção de inúmeros autores com relação a origem deste elemento. Considerando que na maioria dos casos a cristalização da pirosmalita ocorre sob o controle de condições de metamorfismo regional ou associada a estágios finais de alteração hidrotermal (Pan et al. 1993), duas possíveis fontes para o cloro podem ser naturalmente postuladas: uma ligada a fluidos conatos saturados em cloro, como em depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos e de ferro-manganês

Tabela 1 - Ocorrências de minerais da série pirosmalita (atualizado de Pan et al 1993).

| Ocorrências  | Composição                                    | Grau Metamórfico                | Referências   |
|--|---|---------------------------------|---|
| Nordmark, Suécia (Fe, Proterozóico)  | X <sub>Mn</sub> = 0.41-0.49<br>Cl = 3.79-4.88 | fácies anfibolito               | Zambonini 1901 (in Pan et al. 1993), Dana 1920                |
| Dannemora, Suécia (Fe, Proterozóico)                                       | X <sub>Mn</sub> = 0.51<br>Cl = 3.52-3.70      | fácies anfibolito               | Zambonini 1901 (in Pan et al. 1993), Dana 1920                |
| Sterling Hill, New Jersey, EUA (Zn-Fe-Mn, Proterozóico)                    | X <sub>Mn</sub> = 0.76<br>Cl = 3.80           | fácies granulito                | Bauer & Berman 1928 (in Pan et al. 1993), Fronde & Bauer 1953 |
| Broken Hill, Austrália (Pb-Zn-Ag, Proterozóico)                            | X <sub>Mn</sub> = 0.42-0.85<br>Cl = 2.78-3.80 | fácies granulito                | Hutton 1956, Stillwell & McAndrew 1957                        |
| Mina Kyrazawa, Tochigi, Japão (Fe-Mn, Paleozóico)                          | X <sub>Mn</sub> = 0.53-0.82<br>Cl = 5.00-5.63 | ?                               | Watanabe & Kato 1958, (in Pan et al. 1993)                    |
| Depósitos Zashumart e Ushkatyn, Kazakhsitan (Fe-Mn)                        | X <sub>Mn</sub> = 0.60<br>Cl = 3.62           | ?                               | Kayupova 1964 (in Pan et al. 1993)                            |
| Drussas nordmarkite, Grorud, Oslo, Noruega                                 | sem informações                               | ?                               | Oftedal & Saebø 1965 (in Pan et al. 1993)                     |
| Hällfors, Suécia (Ag-Fe-Mn, Proterozóico)                                  | sem informações                               | fácies anfibolito               | Sandfjús et al. 1966 (in Pan et al. 1993)                     |
| Primorye, Rússia (Pb-Zn-Au-Ag, Cretáceo)                                   | X <sub>Mn</sub> = 0.55-0.64<br>Cl = 5.35      | ?                               | Kazachenko et al. 1979 (in Pan et al. 1993)                   |
| Pegmont, Austrália (Pb-Zn, Proterozóico)                                   | X <sub>Mn</sub> = 0.08<br>Cl = 4.00-4.25      | fácies anfibolito               | Vaughan 1986  |
| Salobo, Carajás, Brasil (Cu-Au Arqueano)                                   | sem informações                               | fácies anfibolito               | Guimarães 1987  |
| Wanfanz, Liaoning, China (Mn-Fe, Proterozóico)                             | X <sub>Mn</sub> = 0.65<br>Cl = 3.49           | metamorfismo de contato         | Fan et al. 1992   |
| Mina Matagami Lake, Matagami, Quebec (Zn-Cu-Ag-Au, Arqueano)               | X <sub>Mn</sub> = 0.33-0.85<br>Cl = 0.79-5.42 | fácies xisto verde              | Costa et al. 1983, Pun et al. 1993                            |
| Minas Geco & Wilroy, Manitouwadge, Ontário (Cu-Zn-Zg-Au, Arqueano)         | X <sub>Mn</sub> = 0.17-0.62<br>Cl = 0.12-5.93 | fácies anfibolito a granulito   | Pan & Fleet 1992, Pan et al. 1993                             |
| Mina Thompson, Thompson, Manitoba (Ni-Au-PGE, Proterozóico)                | X <sub>Mn</sub> = 0.10-0.15<br>Cl = 2.73-4.87 | fácies anfibolito a granulito   | Pan et al. 1993   |
| Depósito de Cannington, Cloncurry Dist, Austrália (Ag-Pb-Zn, Proterozóico) | X <sub>Mn</sub> = 0.21-0.23<br>Cl = 4.87-5.39 | ?                               | Dong & Pollard 1997   |
| Depósito Vargenog, África do Sul (Magnetita-Fluorita, Proterozóico)        | X <sub>Mn</sub> = 0.02-0.09<br>Cl = 0.97-4.98 | ?                               | Borrok et al. 1998  |
| Depósito Igarapé-Bahia, Carajás, Brasil (Cu-Au-U-ETR, Arqueano)            | X <sub>Mn</sub> = 0.03-0.08<br>Cl = 2.77-5.38 | fácies xisto verde a anfibolito | Este estudo   |

X<sub>M</sub> = Mn/(Fe + Mn)

Tabela 2 - Composição da ferropirosmalita do depósito de Igarapé Bahia (dados de microsonda - % peso) e fórmulas estruturais calculadas com base em 25(O, OH, Cl).

|                                | A1    | A2    | A3    | A4    | A5    | A6    | A7    | B1    | B2    | B3    | B4    | B5    | B6    | B7    | B8    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 33.86 | 33.75 | 34.18 | 34.25 | 33.89 | 31.92 | 33.44 | 34.50 | 34.56 | 33.90 | 34.51 | 33.91 | 34.00 | 34.34 | 34.71 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.04  | 0.06  | 0.01  | 0.02  | 0.00  | 0.05  | 0.01  | 0.11  | 0.16  | 0.14  | 0.10  | 0.11  | 0.26  | 0.16  | 0.20  |
| MgO                            | 0.30  | 0.06  | 0.17  | 0.01  | 0.00  | 0.32  | 0.01  | 0.10  | 0.16  | 0.05  | 0.21  | 0.07  | 0.07  | 0.09  | 0.22  |
| CaO                            | 0.05  | 0.14  | 0.27  | 0.15  | 0.04  | 1.11  | 0.10  | 0.08  | 0.12  | 0.11  | 0.12  | 0.08  | 0.07  | 0.09  | 0.23  |
| MnO                            | 1.55  | 1.84  | 1.94  | 2.03  | 2.08  | 2.10  | 2.14  | 3.17  | 3.45  | 3.95  | 3.85  | 2.42  | 2.88  | 2.76  | 3.88  |
| FeO*                           | 50.92 | 50.75 | 50.83 | 50.60 | 50.61 | 50.06 | 50.60 | 49.48 | 49.38 | 48.67 | 48.69 | 50.28 | 49.42 | 49.86 | 48.17 |
| Cl                             | 4.30  | 4.37  | 4.31  | 5.05  | 5.38  | 4.93  | 4.83  | 3.87  | 2.98  | 3.38  | 2.77  | 4.06  | 4.23  | 4.27  | 3.08  |
| H <sub>2</sub> O**             | 7.32  | 7.27  | 7.38  | 7.17  | 7.02  | 6.94  | 7.11  | 7.52  | 7.79  | 7.56  | 7.81  | 7.39  | 7.35  | 7.40  | 7.76  |
| O=Cl                           | 0.97  | 0.99  | 0.97  | 1.14  | 1.21  | 1.11  | 1.09  | 0.87  | 0.67  | 0.76  | 0.63  | 0.92  | 0.95  | 0.96  | 0.70  |
| Total                          | 97.36 | 97.26 | 98.12 | 98.13 | 97.81 | 96.29 | 97.15 | 97.96 | 97.93 | 97.01 | 97.44 | 97.41 | 97.33 | 98.01 | 97.55 |

| Número de cátions na base de 25 (O, OH, Cl) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Si  | 6.04 | 6.04 | 6.05 | 6.08 | 6.06 | 5.84 | 6.02 | 6.08 | 6.06 | 6.04 | 6.07 | 6.04 | 6.05 | 6.07 | 6.09 |
| Al  | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.03 | 0.04 |
| Fe  | 7.59 | 7.59 | 7.52 | 7.51 | 7.56 | 7.67 | 7.61 | 7.29 | 7.25 | 7.25 | 7.17 | 7.49 | 7.35 | 7.36 | 7.07 |
| Mn  | 0.23 | 0.28 | 0.29 | 0.31 | 0.32 | 0.32 | 0.33 | 0.47 | 0.51 | 0.60 | 0.57 | 0.36 | 0.43 | 0.41 | 0.58 |
| Mg  | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 | 0.03 | 0.04 | 0.01 | 0.05 | 0.20 | 0.02 | 0.02 | 0.06 |
| Ca  | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.01 | 0.22 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.04 |
| Cl  | 1.30 | 1.32 | 1.29 | 1.52 | 1.63 | 1.53 | 1.47 | 1.16 | 0.89 | 1.02 | 0.83 | 1.23 | 1.28 | 1.28 | 0.92 |
| OH  | 8.70 | 8.68 | 8.71 | 8.48 | 8.37 | 8.47 | 8.53 | 8.84 | 9.11 | 8.98 | 9.17 | 8.77 | 8.73 | 8.72 | 9.08 |
| Fe/(Fe+Mn)                                  | 0.97 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.94 | 0.93 | 0.92 | 0.93 | 0.95 | 0.94 | 0.95 | 0.92 |
| Mn/(Fe+Mn)                                  | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.08 |

A = Amostra BAH-F349/ACP - 480.40m B = Amostra BAH-F353/ACP - 178.00m  
 \*Índice Fe como FeO  
 \*\* H<sub>2</sub>O calculada inicialmente por diferença e recalculada de OH = (10 - Cl)

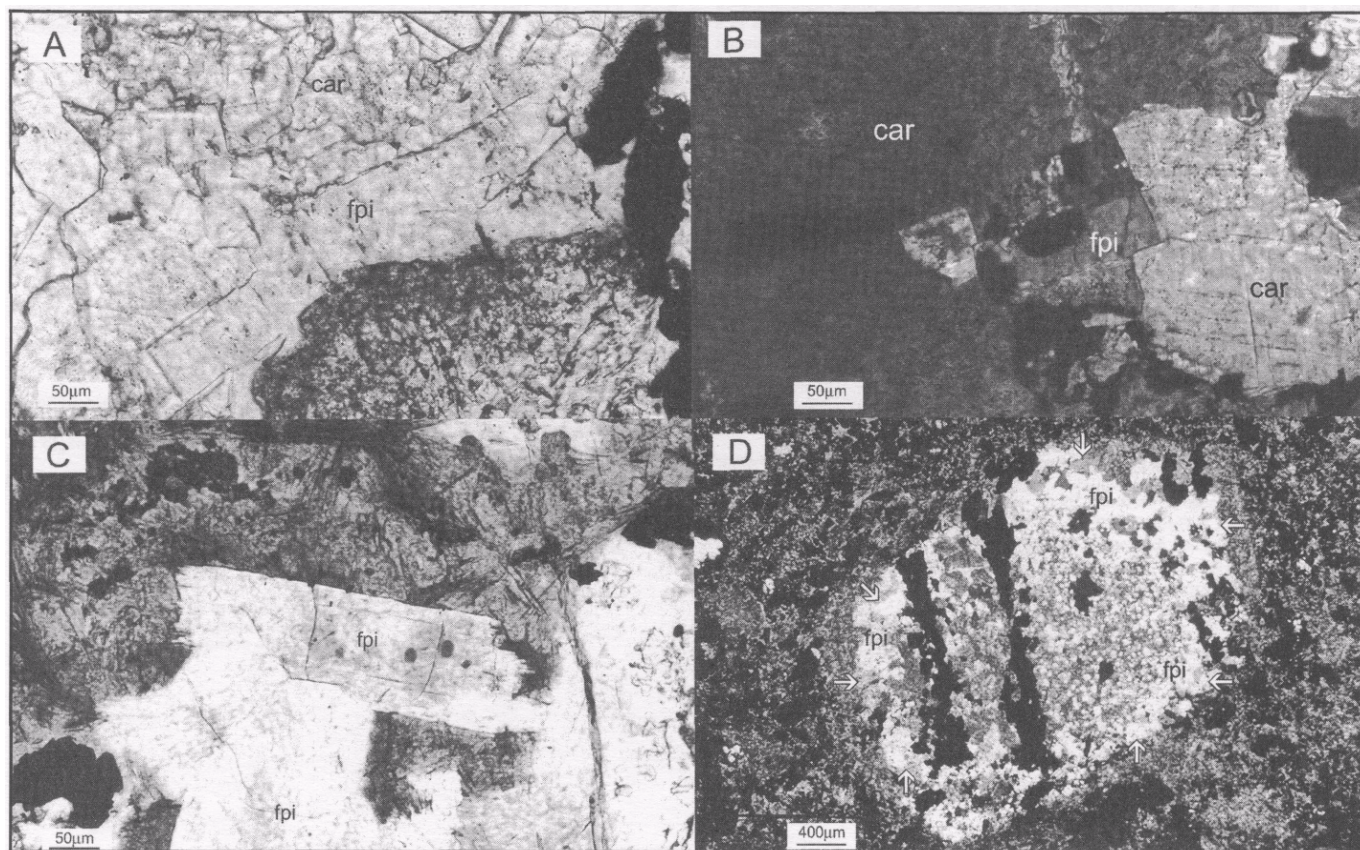


Figura 3 - Fotomicrografias A e B - Cristais de ferropirosmalita (fpi) associados a carbonato (car), magnetita, calcopirita e bornita (opacos, N// e NX respectivamente). Fotomicrografia C - Cristal de ferropirosmalita em fragmento de rocha metabásica de brecha heterolítica, NX. Fotomicrografia D - Cristais de ferropirosmalita marginando fragmento de formação ferrífera bandada de brecha heterolítica com matriz fina rica em anfibólito, magnetita, calcopirita e bornita, NX.

sedimentar-exalativos; e outra associada a fluidos magmáticos, como em alguns depósitos ligados a intrusões ácidas (e.g. depósitos de Au-Cu porfiríticos).

No depósito de Igarapé Bahia, a forma predominantemente eudétrica dos cristais de ferropirosmalita, aliada à sua distribuição dispersa na matriz de brechas heterolíticas ricas em magnetita, sulfetos e carbonatos, e também marginando fragmentos de formações ferríferas e vênulas carbonáticas, sugerem uma hipótese de crescimento metamórfico e tardio para esse mineral. O seu mecanismo de crescimento teria envolvido, sobretudo, a substituição de minerais ricos em ferro pela introdução de fluidos ricos em cloro. A percolação desses fluidos teria sido facilitada pela elevada permeabilidade das brechas e também pela descontinuidade ao longo das paredes das vênulas carbonáticas.

Estudos de inclusões fluidas realizados em quartzo de vênulas carbonáticas revelam a existência de fluidos com alta salinidade (até 42% eq. NaCl em peso), aprisionados sob temperaturas de até 400°C (Ribeiro 1989). Essas informações, quando interpretadas em conjunto com dados da composição de isótopos de carbono e oxigênio em carbonatos dessa associação (Oliveira *et al.* 1998), que mostraram variação estreita dos valores negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (-9,3 e -5,8‰), são

consistentes com o envolvimento de fluidos homogêneos ricos em  $\text{CO}_2$ , provavelmente de origem magmática, enquanto a ampla variação de  $\delta^{18}\text{O}$  (+ 0,7 e +9,4‰) denota interpretação mais pomemorizada. Os valores mais positivos de  $\delta^{18}\text{O}$  podem estar associados a fluidos magmáticos sob temperaturas mais elevadas, que teriam interagido progressivamente com fluidos cujos valores muito baixos de  $\delta^{18}\text{O}$  são sugestivos da participação de componentes superficiais de baixas temperaturas.

O caráter magmático hidrotermal da ferropirosmalita e, consequentemente, o seu crescimento com temperaturas mais elevadas é ainda corroborada pela associação paragenética com anfíbio.

**Agradecimentos** Ao CNPq e à Fapemig pelo apoio financeiro. A CVRD/Sumen, através do geólogo José Luzimar do Rego, pela liberação da área de estudo e infra-estrutura durante a etapa de campo. A CVRD/Sutec pelas análises de microsonda eletrônica e EDS. Aos geólogos Clóvis Wagner Maurity e Henrile Pinheiro Meireles pelo acompanhamento e discussões durante a etapa de campo. Aos laboratórios de microsonda eletrônica e de isótopos estáveis da Universidade de Brasília. Aos dois revisores anônimos que muito contribuíram para o aprimoramento deste trabalho.

## Referências

- Althoff A.M.R., Villas R.N., Giuliani G. 1994. A mineralização cuprífera da Área Bahia, Serra dos Carajás (PA): Evolução dos fluidos hidrotermais e modelo metalogenético. *Geochimica Brasiliensis*, **8**:135-155
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., João X.S.J. 1991. Trabalhos anteriores e contexto geológico regional. In: Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará. Brasília; DNP/CPRM*, p. 17-49.
- Barros C.E. de M., Dal'Agnol R., Barbey P., Boullier A.-M. 1997. Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás region, Brazil: an example of an Archaean A-type granitoid. *Journal of South American Earth Sciences*, **10**: 321-330.
- Borrok D.M., Kesler S.E., Böer R.H., Essene E.J. 1998. The Vergenoeg magnetite-fluorite Deposit, South Africa: Support for a hydrothermal model for a massive iron oxide deposits. *Economic Geology*, **93**:564-586.
- Costa U.R., Barnett R.L., Kerrich R. 1983. The Mattagami Lake Mine Archean Zn-Cu Sulfide Deposit, Quebec: hydrothermal coprecipitation of tale and sulfides in a sea-floor brine pool - evidence from geochemistry,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , and mineral chemistry. *Economic Geology*, **78**:1144-1203.
- Dana E.S. 1920. *The system of mineralogy of James D. Dana. Descriptive Mineralogy*. 6ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. 1134p.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, *Anexo aos Anais*, p. 11-56.
- Dong G. & Pollard P.J. 1997. Identification of ferropirosmalite by Laser Raman microprobe in fluid inclusions from metalliferous deposits in the Cloncurry District, NW Queensland, Austrália. *Mineralogical Magazine*, **61**: 291-293.
- Fan D., Dasgupta S., Bolton B.R., Hariya Y., Momoi H., Miura H., Jiayu L., Roy S. 1992. Mineralogy and geochemistry of the Proterozoic Wafangzi ferromanganese deposit, China. *Economic Geology*, **87**:1430-1440.
- Ferreira Filho C.F. 1985. *Geologia e mineralizações sulfetadas do Prospecto Bahia, Província Mineral de Carajás, PA*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 112 p.
- Ferreira Filho C.F. & Danni J.C.M. 1985. Petrologia e mineralizações sulfetadas do Prospecto Bahia -Carajás. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 2, Belém, *Anais*, 3:34-47.
- Frondel C. & Bauer L.H. 1953. Manganpyrosmalite and its polymorphic relation to friedelite and schallerithe, *The American Mineralogist*, **38**:755-760.
- Guimarães I.G. 1987. Petrologia da formação ferrífera na área Salobo 3 - Província Mineral de Carajás, PA. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 99 p.
- Haynes D.W., Cross K.C., Bills R.T., Reed M.H. 1995. Olympic Dam ore genesis: a fluid-mixing model. *Economic Geology*, **90**:281-307.
- Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M.T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, **58**:241-287.
- Huhn S.R.B. 1996. São os depósitos cupríferos de carajás do tipo Cu-Au-U-(ETR)? In: SBG/Núcleo Norte, Simpósio de Geologia da Amazônia, 5, Belém, *Boletim*, 140-143.
- Huhn S.R.B. & Nascimento J.A.S. 1997. São os depósitos cupríferos de Carajás do tipo Cu-Au-U-ETR? In: Costa M.L. & Angélica R.S. (coords.) *Contribuições a Geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-NO. P. 143-160.
- Hutton C. 0.1956. Manganpyrosmalite, bustamite and ferroan johannsenite from Broken Hill, New South Wales, Austrália. *American Mineralogist*, **41**:581-591.
- Kato T. & Takéuchi Y. 1983. The pyrosmalite group of minerals I. Structure refinement of manganpyrosmalite. *The Canadian Mineralogist*, **21**:1-6.
- Mougeot R., Respaut J.P., Brique L., Ledru P., Milesi J.P., Lerouge C., Marcoux E., Huhn S.B., Macambira M.J.M. 1996. Isotope geochemistry constrains for Cu, Au mineralizations and evolution of the Carajás Province (Para, Brazil). In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 39, Salvador, *Anais*, 7:321-324.
- Oliveira C.G. de, Tazava E., Tallarico F., Santos R.V., Gomes C. 1998. Gênese do Depósito de Au-Cu-(U-ETR) de Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, *Anais*, p. 137.
- Pan Y. & Fleet M.E. 1992. Mineralogy and genesis of calc-silicates associated with Archean volcanogenic massive deposits at the Manitowadge mining camp, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **29**:1375-1388.
- Pan Y., Fleet M.E., Barnett R.L., Chen Y. 1993. Pyrosmalite in Canadian Precambrian sulfides deposits: mineral chemistry, petrogenesis and significance. *The Canadian Mineralogist*, **31**:695-710.
- Ribeiro A.M.R. 1989. *Estudo Geoquímico do sistema hidrotermal relacionado à mineralização cuprífera da Área Bahia, serra dos Carajás, PA*. Universidade Federal do Pará, Belém, Dissertação de Mestrado, 134p.
- Sachs L.L.B. 1993. *O magmatismo associado ao depósito mineral cupro-aurífero do Igarapé Bahia, Carajás, PA, Brasil*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dissertação de Mestrado, 142p.
- Soares A.D.V., Ronzê P.C., Santos M.G.S. dos, Leal E.D., Barreira C.F. 1999. Geologia e mineralizações do Depósito de Cu-Au Alemão - Província Mineral de Carajás (PA). In: SBG/NO, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Manaus, *Boletim*.
- Stillwell F.L. & Macandrew J. 1957. Pyrosmalite in the Broken Hill lode, New South Wales. *Mineralogical Magazine*, **31**:371-380.
- Tallarico F.H.B., Rego J.L., Oliveira C.G. 1998. A mineralização de Au-Cu de Igarapé Bahia - Carajás: um depósito da classe óxido de Fe (Cu-U-Au-ETR). In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, *Anais*, p. 116.
- Tazava E. 1999. *Mineralização de Au-Cu-(=ETR-U) associada às brechas hidrotermais do depósito de Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás, PA*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de mestrado, 81 p.
- Vaughan J.P. 1986. The iron end-member of pyrosmalite series from the Pegmont lead-zinc deposit, Queensland. *Mineralogical Magazine*, **50**:527-531.
- Vaughan J.P. 1987. Ferropirosmalite and nomenclature in the pyrosmalite series. *Mineralogical Magazine*, **51**:174.

Manuscrito A-1059

Recebido em 20 de novembro de 1998

Revisão dos autores em 15 de junho de 1999

Revisão aceita em 20 de junho de 1999