

## RESUMOS DE TESES

### ASPECTOS LITO-ESTRUTURAIS E CONTROLE DAS MINERALIZAÇÕES DO DEPÓSITO SALOBO 3A (SERRA DOS CARAJÁS/PA)

JOSÉ BATISTA SIQUEIRA

Universidade Federal do Ceará – jbs@ufc.br

O quadro geológico da região do Salobo, situada na Serra dos Carajás, faz parte do sistema transcorrente Cinzento e compreende gnaisses do Complexo Xingu e rochas supracrustais do Grupo Salobo, que se relacionam através de várias gerações de zonas de cisalhamento. O Complexo Xingu abarca gnaisses bandados de composições tonalítica, trondhjemitica e granodiorítica, e parcialmente migmatizados. O Grupo Salobo inclui magnetita-fayalita xistos, biotita-almandina-magnetita-fayalita-grünerita xistos, biotita xistos, anfibólito xistos, clorita xistos, formações ferríferas bandadas e quartzitos.

As zonas de cisalhamento mais antigas correspondem a cavalgamentos dúcteis que respondem pela imbricação generalizada das unidades litológicas expressa sobretudo através do aleitamento definido pela alternância de faixas e lentes de rochas supracrustais com faixas de gnaisses; essa estruturação foi correlacionada com a movimentação que formou o sistema imbricado do Cinturão Itacaiúnas. Durante essa movimentação houve transformações minerais em condições térmicas da fácies anfibólito, bem como modificações importantes nas relações estratigráficas entre os diversos conjuntos litológicos.

A segunda geração de zonas de cisalhamento compõe o dúplex transtensivo Salobo-Mirim. Tratam-se de zonas de cisalhamento transcorrentes sinistrais ligadas através de zonas de cisalhamento normais, ao longo das quais há registros de transformações minerais em fácies

*The Salobo district is located in the Cinzento strike-slip system in the Carajás Province, and is formed of supracrustal rocks of the Salobo Group and gneisses of Xingu Complex, which were assembled by several generations of shear zones. The Salobo Group includes magnetite-fayalite schist, biotite-almandine-magnetite-fayalite-grünerite schist, biotite schist, amphibole schist, chlorite schist, banded iron formation, and quartzite. The Xingu Complex includes banded tonalitic gneisses, trondhjemitic and granodioritic gneisses, partially migmatized.*

*The older shear zones correspond to ductile thrusts to which the generalized imbrication of the lithological units and the tectonic layering, defined by strips and lenses of supracrustal rocks alternated with gneiss is due. Their movements is synchronous to that of the Itacaiúnas belt; mineral transformations under thermal conditions of amphibolite facies, as well as important modifications in the stratigraphic relationships of several lithological units, are related to them.*

*The second generation of shear zones formed the transtensive Salobo-Mirim duplex. They are sinistral strike-slip shear zones, linked by normal shear zones along which minerals transformations of green-*

*xisto verde. O desenvolvimento do dúplex foi fortemente controlado pela geometria do aleitamento, e a sua forma assimétrica foi em grande parte imposta pela presença de uma megalente de gnaisse do embasamento.*

*A terceira geração de zonas de cisalhamento corresponde a transcorrentes orientadas nas direções NW-SE e NNW-SSE, impõe modificações expressivas na geometria do dúplex Salobo-Mirim, e é interpretada como feições tipo X ligadas à movimentação sinistral. As zonas de cisalhamento do extremo oeste da área parecem representar projeções da terminação em rabo-de-cavalo da falha Carajás e, nesse caso, poderiam constituir cavalgamentos oblíquos.*

*O depósito do Salobo 3A localiza-se na parte central de uma zona de cisalhamento normal oblíqua que pertence a um segmento curvo transtensivo, ao longo da zona de cisalhamento transcorrente mestra do dúplex Salobo-Mirim. As mineralizações de cobre e ouro acham-se alojadas em estruturas dilatacionais, destacando-se as seguintes: estruturas pull-part simples e compostas, cordões de sigmóides transtensivos, tension gashes, sombras de pressão e estruturas em estrela em cruzamentos de descontinuidades.*

*O depósito Salobo 3A é um exemplo de concentração e/ou reconcentração de mineralizações de cobre e ouro em zonas de cisalhamento transtensionais devido à atuação conjunta de processos deformacionais, metamórficos e hidrotermais.*

*schist facies occurred. The former tectonic layering controlled the development of the duplex, and its asymmetric shape was influenced mainly by the presence of a basement gneiss megalense.*

*The third generation of shear zones is of transcurrent type, with NW-SE and NNW-SSE trends, which modified the Salobo-Mirim duplex geometry, and are interpreted as X features linked to the sinistral movements. The shear zones of the west corner of the area represent the propagation of a horse tail structure at the West end of the Carajás fault; in this case, they could be oblique thrust.*

*The Salobo 3A deposit is situated in the central part of a normal oblique shear zone, which belongs to a release bend along the main strike-slip shear zone of the Salobo-Mirim duplex. The copper and gold mineralizations are hosted in extension structures, as single and composite pull-apart structures, transtensive sigmoid stringers, tension gashes, pressure shadows and star structures in the cross-cutting zones of discontinuities.*

*The Salobo 3A deposit is an example of concentration/reconcentration of copper and gold mineralizations in a transtensive shear zone due to deformational, hydrothermal and metamorphic processes.*

\* Resumo nº 551 - Tese de doutoramento – Outubro de 1996, Centro de Geociências UFPa.

### EVOLUÇÃO PETROQUÍMICO-METALOGENÉTICA DAS ROCHAS E MINERALIZAÇÕES ASSOCIADAS À SUÍTE VILA NOVA NA SERRA DO IPITINGA (NW DO PARÁ)

MARIA TELMA LINS FARACO

AV. Magalhães Barata 110 Apt 1502, 66040-170, Belém-PA

A Suíte Vila Nova na Serra do Ipitinga (NW do Pará) consiste em uma sequência de rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas, rochas a cordierita-antofilita e a quartzo-clorita, às quais estão sobrepostos metassedimentos químicos (BIFs tipos óxido e silicato) e clásticos. Parte das lavas básicas foi hidrotermalmente alterada em condições similares às de sistemas hidrotermais atuais, ao longo de eixos de expansão oceânicos, formando rochas a quartzo-clorita e mineralizações sulfetadas do tipo vulcanogênico-hidrotermal sindeposicional, constituídas de pirrotita-pirita-calcopirita-esfalerita, com Au e Ag

associados, além de traços de galena e molibdenita. As temperaturas de formação dessas rochas, calculadas a partir de cloritas saturadas em Al, variam de 273°C a 320°C, com valor médio de 308°C. Posterior metamorfismo regional até a fácies anfibólito transformou parte das lavas básicas em anfibólitos e parte das rochas a quartzo-clorita em rochas a cordierita-antofilita. Os cálculos geotermométricos para o par cordierita-antofilita, apontam valor médio de 547°C para formação dessas rochas. As atuais associações mineralógicas das formações ferríferas e dos metassedimentos clásticos foram geradas a partir de

reações metamórficas durante esse evento. Todo o pacote vulcano-sedimentar foi deformado de maneira dútil e dúctil, assumindo a atual configuração estrutural, em faixas alongadas segundo NW-SE, com mergulhos subverticais geralmente para NE e desenvolvendo zonas de cisalhamento. A formação dessas zonas está relacionada à geração de milonitos e rochas polimetamorfizadas e hidrotermalizadas, exibindo associações metamórficas retrogressivas. As intrusões de rocha granítica no pacote metavulcano-sedimentar propiciou metamorfismo termal, além de alterações hidrotermais nas diversas rochas da sequência. O ouro está presente na Suíte em três tipos distintos de jazimentos: associado a sulfetos vulcanogênicos, em *lodes* cisalhados (com calcopirita, pirita e covelita) e em muitas rochas alteradas por processos supergênicos. Índcios de Pt foram registrados em muitas rochas hidrotermalizadas, mas não associados à mineralização sulfetada. Quatro eventos hidrotermais foram identificados. Os estudos de inclusões fluidas feitos nas hospedeiras das mineralizações sulfetadas, em rochas a cordierite-antofilita e em veios de quartzo cisalhados, caracterizaram doze tipos de inclusões, relacionadas a dois sistemas de fluidos, ligados a eventos hidrotermais peculiares. Um aquo-carbônico, constituído principalmente por CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O, e um outro

*The Vila Nova Metamorphic Suite in the Ipitinga Hills (NW Pará), consists of a supracrustal sequence of mafic and ultramafic metavolcanics, cordierite-antophyllite - and quartz-chlorite-bearing rocks underlying chemical (oxide and silicate-type BIFs) and clastic metasediments. Part of the basic lavas was hydrothermally altered under greenschist facies conditions, similar to mid-ocean-ridge axis hydrothermal systems, creating quartz-chlorite-bearing rocks (which occur as large clots within the metavolcanic sequence) and hydrothermal syndepositional exhalative volcanogenic sulphide deposits, formed by pyrrhotite, pyrite, chalcopyrite and sphalerite with associated Au and Ag and traces of galena, molybdenite and silver telluride. The temperature range of generation of these host rocks, calculated from Al-saturated chlorite, is 273°C to 320°C, with an average value of 308°C. Afterwards, metamorphism under amphibolite facies transformed the basic volcanics to amphibolites, and part of the quartz-chlorite to cordierite-antophyllite rocks. Geothermometric calculations using the cordierite-antophyllite pair, point to 547°C for the generation of these rocks. Present-day mineralogical associations of BIFs and clastic metasediments were formed during that metamorphism. All the metavolcano-sedimentary sequence was deformed by brittle-ductile shearing and transformed in present-day NW-SE trending shear belts with subvertical-NE dip. The deformational shearing episode yielded mylonites, polymetamorphic and hydrothermalized rocks, showing retrogressive metamorphic paragenesis. There was also hydrothermal alteration produced by granitic fluids. Gold is present in three typologies: associated to volcanogenic sulphides,*

aquoso salino. As temperaturas de homogeneização finais das inclusões nas hospedeiras da mineralização são compatíveis com o intervalo 250°-450°C para origem dessas rochas. As isócoras de CH<sub>4</sub> e o intervalo de temperatura de formação das hospedeiras, permitiram o cálculo do intervalo de 0,7Kb a 2,3Kb para geração da mineralização sulfetada. Os protólitos das rochas metavulcânicas são basaltos subalcalinos toleíticos. Basaltos komatiíticos foram também caracterizados, indicando a presença de uma série komatiítica no magmatismo. Os dados litoquímicos apontam para um ambiente equivalente aquele das bacias trás-arcos para a deposição das rochas metavulcânicas máficas. Estudos isotópicos pelo método Sm-Nd revelam idades modelos de 2,6 Ga a 2,19 Ga para as metavulcânicas. O padrão de distribuição de ETR nas BIFs são compatíveis com os das BIFs paleoproterozóicas. Esses fatos são condizentes com as idades de 2,11 Ga (Sm/Nd) e 2,25 Ga (U/Pb) atribuídas ao vulcanismo inicial em unidades correlatas à Suíte Vila Nova na Guiana Francesa e Guiana. Os dados petrológicos, geoquímicos, metalogenéticos e geocronológicos da Suíte Vila Nova permitem correlacioná-la às sequências metavulcano-sedimentares paleoproterozóicas birrimianas do Cráton Oeste Africano.

*sheared lodes, and supergene altered rocks. Platinum anomalies were registered in many hydrothermalized rocks, but not in association with sulphide mineralization. Four hydrothermal events were identified. Fluid inclusion studies indicated twelve types of inclusions which pointed to two fluid systems, one consisting of a CH<sub>4</sub>-rich aqueous-carbonic phase and the other of an aqueous phase with salinities ranging from 40% CaCl<sub>2</sub> equivalent to near pure water. The first is related to sulphide-bearing rocks and the second to the shearing episode. The homogenization temperatures of the fluid inclusions in the sulphide mineralization's host-rocks, point to 250°C-450°C to the origin of these rocks. The CH<sub>4</sub>-isochores and the temperature range of generation of the host-rocks, provide a pressure range of 0,7 kb to 2,3 kb for the mineralization. The protoliths of mafic metavolcanics are subalkaline tholeiitic basalts. Komatiitic basalts were also characterized, suggesting the presence of a komatiitic affinity to the magmatism. The lithochemical study revealed a volcanic environment similar to back-arc basins to the Vila Nova Suite. The Nd isotopic study yielded model ages between 2.26 Ga and 2.19 Ga for Vila Nova metavolcanics, while the BIF's REE patterns are equivalent to many Paleoproterozoic banded iron-formation of the world. This is in agreement with the 2.11 Ga (Sm/Nd) and 2.25 Ga (U/Pb) ages from French Guyana and Guyana's rocks, correlatives to Vila Nova Suite. The petrological, lithochemical, metallogenetic and isotopic data from the Vila Nova metamorphic suite account also for its correlation with the paleoproterozoic birimian metavolcano-sedimentary belts of the West African craton.*

\* Resumo nº 552 - Tese de Doutorado - maio de 1997 - Instituto de Geociências - UFPa - Belém - PA.

## A MINA DE OURO DE CUIABÁ, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS

LUIZ CLÁUDIO RIBEIRO-RODRIGUES

Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Campus, Ouro Preto-MG, CEP: 30400-000

A mina de ouro de Cuiabá localiza-se na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, Brasil. A região representa um terreno tipo granito-greenstone, composto por um Complexo do embasamento (ca. 3.2 Ga) e pela sequência tipo greenstone belt do Supergrupo Rio das Velhas (3.0-2.7 Ga), sobreposto pelas sequências supracrustais proterozóicas dos Supergrupos Minas (< 2.6-2.1 Ga) e Espinhaço (1.7 Ga). A área de estudos pertence ao Grupo Nova Lima, unidade inferior do Supergrupo Rio das Velhas. A sequência litológica do depósito compreende, da base para o topo, metavulcânicas máficas inferiores intercaladas com metassedimentos carbonosos, a Formação Ferrífera Bandada (FFB) Cuiabá, hospedeira da mineralização, metavulcânicas máficas superiores, metavulcanoclásticas e metassedimentos. O metamorfismo alcançou a facies xisto verde. As estruturas tectônicas da área do depósito são geneticamente relacionadas a três fases de deformação, desenvolvidas sob regime de compressão crustal, representando um único evento deformacional progressivo (E<sub>n</sub>). Este evento, que ocorreu depois da deposição do Supergrupo Minas, é responsável pela geração de dobras, superfícies de plano axial, foliações miloníticas, lineações, falhas, zonas e fraturas de cisalhamento. A fase D<sub>1</sub> é responsável pela geração da estrutura dominante do depósito, um amplo e fechado antiforme (dobra em

bainha tubular), mergulhando para sudeste (22-40°), com uma penetrativa foliação plano axial (S<sub>1</sub>=135 / 45). Esta foliação progride localmente para uma foliação milonítica e contém uma proeminente lineação mineral, por vezes com caráter de estiramento (L<sub>m1</sub>=116 / 34). Os componentes dominantes da BIF não mineralizada são camadas quartzo-carbonáticas e de chert alternantes que variam de escala milimétrica à métrica. Os padrões de distribuição de elementos maiores e traços da FFB Cuiabá são semelhantes a outras formações ferríferas arqueanas. A maior parte da mineralização de ouro está relacionada a 6 corpos de minério principais, variando entre 1 e 6 m de espessura, contidos dentro do horizonte de BIF. Os corpos mineralizados consistem de porções ricas em sulfetos da FFB Cuiabá (> 4 ppm Au), possuem cores variando das tonalidades claro a escuro e apresentam localmente uma aparência maciça, sem bandamento ou feições de recristalização. Transições entre FFB mineralizadas e não mineralizadas envolvem uma diminuição da composição modal de sulfetos de 30-70 vol.% para 1 vol.% e decréscimo dos teores de ouro de 60 ppm para valores inferiores ao limite de detecção. Mineralização subordinada ocorre associada com sulfetos disseminados e/ou veios de quartzo em zonas de cisalhamento dentro de metavulcânicas e metassedimentos. O depósito é do tipo gold-only e mostra uma associação carac-

terística de Au com Ag, As, Sb e baixo teor de metais básicos (< 0.2 vol.%). O ouro é fino (3-60  $\mu\text{m}$ ) e está associado com camadas de sulfeto, ocorrendo como inclusões, em fraturas e em contato com cristais de pirita, o principal sulfeto (> 90 vol.%). Quimicamente o ouro é caracterizado por uma fineza média de 840 (Au/Ag = 1:6) e uma ampla variação de *fineness* (759-941). As rochas adjacentes à FFB mineralizada exibem forte sericitização, carbonatação e cloritização. Texturas observadas em escala microscópica até à escala de mina indicam que as camadas sulfetadas são resultado de processo de sulfetação envolvendo a substituição de carbonatos de ferro (siderita e ankerita) por sulfetos. Estudos de microtexturas indicam que a deposição de ouro ocorreu simultaneamente com a precipitação dos sulfetos devido a reações de interação fluido-rocha, que provocaram a instabilidade dos complexos de ouro, diminuindo a atividade de enxofre. A forte associação da mineralização aurífera com sulfetos sugere que complexos reduzidos de enxofre foram os principais agen-

*Iron-formations are a ubiquitous feature of almost all Archaean granite-greenstone terranes of Brazil. However only the Rio das Velhas greenstone belt sequence (3.0-2.7 Ga), situated in the Quadrilátero Ferrífero (Iron Quadrangle), Minas Gerais State, contains economic-grade banded iron-formation (BIF)-hosted gold mineralization (e.g., Ladeira 1991, Vieira 1991). The region is one of the major provinces of this type of gold deposits in the world. The gold production of the Quadrilátero Ferrífero to date amounts to over 1000 t of gold, which equals almost half of the total gold production of Brazil. Approximately 540 t has come from Archaean BIF-hosted gold deposits. At present 5 mines (Cuiabá, São Bento, Raposos, Morro Velho and Esperança) are producing 1,000,000 t ore per year with grade varying from 8 to 11 g/t Au. Proven gold reserves exceed 250 t. The Cuiabá Gold Mine (a world-class gold deposit with proven reserves exceeding 180 t Au) constitutes, at the moment, the major gold producer in the Quadrilátero Ferrífero. Economic-grade gold mineralization is associated with one single (up to 15 m thick) horizon of Algoma-type, carbonate-facies banded iron-formation. The Cuiabá-BIF lies between mafic metavolcanics in the footwall and carbonaceous metasediments in the hanging wall. Tectonic structures in the Cuiabá Mine area are genetically related to three deformational phases ( $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ) which took place under crustal compression representing one progressive deformational event ( $E_n$ ) (Ribeiro-Rodrigues 1998). The dominant structure of the deposit is a km-scale, southeast plunging (20-40°) tubular sheath fold. All lithologies are affected by a pervasive foliation (135/45) and show a prominent mineral-stretching lineation (116/34). Because of extensive deformation, recrystallization and remobilization of constituents, with exception of the bedding, primary sedimentary structures are difficult to identify. Typical mineralogy of the unmineralized Cuiabá-BIF includes siderite, ankerite, quartz and minor amounts of calcite and carbonaceous matter. The gold orebodies represent mineralized segments of the Cuiabá-BIF (> 4 ppm Au) which grade laterally into weaker mineralized or barren iron-formation. The ore shoots consist of alternating sulfide, light quartz-carbonate, dark carbonate-quartz and chert layers (varying in thickness from a few millimeters up to one meter) and show a consistent down-plunge continuity parallel to the  $L_1$  stretching lineation. Pyrite is the predominant sulfide mineral (> 90 vol. %). Other sulfide phases are pyrrhotite, arsenopyrite, chalcopyrite, sphalerite and galena. Gold is*

tes envolvidos no transporte de ouro. A mineralização apresenta várias feições observadas em depósitos de ouro do Arqueano: (1) o ouro está associado com rochas ricas em ferro; (2) o depósito apresenta um forte controle estrutural, com uma marcante continuidade dos corpos de minério ao longo do *plunge* (> 3000 m) relativamente à direção e à potência (até 20 m); (3) a natureza epigenética da mineralização, tendo a sulfetação como principal processo de deposição do ouro; (4) a assinatura geoquímica do minério (consistente associação Au-Ag-As-Sb e baixos teores de metais básicos) é compatível com fluidos metamórficos. As texturas e estruturas do minério indicam uma mineralização epigenética, com forte controle estrutural, dominada por feições de substituição durante a fase  $D_1$  do evento  $E_n$ . Os corpos apresentam uma continuidade consistente ao longo do „*plunge*“ e são paralelos à lineação de estiramento  $L_{m1}$  e de interseção  $L_1$ . Localmente, a mineralização foi remobilizada durante as subseqüentes fases de deformação  $D_2$  e  $D_3$ .

*fine-grained (< 60  $\mu\text{m}$ ) and occurs as inclusions, in fractures and along grain boundaries of pyrite. Silver contents in gold grains vary from 8 to 24 wt.-percent. A characteristic feature commonly associated with the mineralization is the pervasive and selective replacement of carbonate-quartz layers (normally the Fe-richer dark layers) by iron sulfides. This is observed both on a hand specimen- as well on a mine-scale. Transitions from sulfide-rich to sulfide-free BIF exhibits decreasing abundance of sulfides from 30-70 vol. % to less than 1 vol. % and decreasing gold contents from over 60 ppm to less than the fire assay detection limit over short distances (1 to 3 meter). Chemical changes during sulfidation involve significant addition of S and Au and increases of Ca, As, Cu. These elements were consumed in forming sulfides (S, As, Cu), native gold (Au, Ag) and carbonates (Ca). The close association of gold mineralization with pyrite suggests that reduced sulfur complexes were the predominant transport mechanism. Microtextural studies indicate that gold deposition occurred simultaneously with pyrite precipitation due to fluid-wallrock sulfidation reactions, which induced instability of gold complexes, decreasing the sulfur activity. The genesis of the gold mineralization at Cuiabá is controversially discussed, involving syngenetic versus epigenetic models. The straiiform nature of the mineralization suggests a syngenetic concentration of gold during seafloor deposition of sulfide facies BIF (e.g., Ladeira 1991). However, the results of detailed textural and structural study of the Cuiabá orebodies (Ribeiro-Rodrigues 1998) do not favor this model. Conversely, an epigenetic origin of the gold mineralization is clearly indicated by (1) the selective and pervasive replacement of carbonate layers by sulfides. The mineralized portions of the Cuiabá-BIF are the result of post-sedimentary sulfidation, forming large replacement orebodies. The extensive replacement has imparted a pseudo-synsedimentary pattern to the gold ores which show alternating epigenetic sulfide layers and primary quartz-carbonate and chert bands; (2) the structural control of the ore shoots which are parallel to the  $D_1$ -phase mineral-stretching lineation. These features indicate that the BIF-hosted gold emplacement is related to a focused fluid flow, along structurally induced permeability (i.e. parallel to the stretching lineation, along shear zones and/or faults) during the  $E_n$  orogeny. Precipitation of the gold and the sulfides occurred along intersections of the channeled fluid flow with the banded iron-formations, which acted as a chemically favorable host rock.*

**NOTA DO EDITOR – Esta Tese está publicada como livro sob a seguinte referência: RIBEIRO-RODRIGUES, L. C. 1998. Gold in Archaean banded iron-formation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine. Ph.D. Thesis, Aachen University of Technology. Augustinus Verlag, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, Band 27, 264 pp.**

\* Resumo nº 553 - Tese de doutorado – 1998 - Universidade Técnica de Aachen, Alemanha (CAPES/DAAD, CNPq)