



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 136

**GEOLOGIA, ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E GÊNESE DO
DEPÓSITO IOCG CRISTALINO, PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS, BRASIL**

Tese apresentada por:

GUSTAVO SOUZA CRAVEIRO

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Perez Xavier (UNICAMP)

**BELÉM
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S719g Souza Craveiro, Gustavo
Geologia, alteração hidrotermal e gênese do depósito IOCG Cristalino, Província Mineral de Carajás, Brasil. / Gustavo Souza Craveiro. — 2018
xxviii, 165 f. : il. color
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas
Coorientação: Prof. Dr. Roberto Perez Xavier.
1. Química Mineralógica. 2. Inclusões Fluidas. 3. Isótopos Estáveis. 4. Província Mineral de Carajás. 5. Depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro. I. Netuno Nobre Villas, Raimundo, *orient.* II. Título
-



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia E Geoquímica

**GEOLOGIA, ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E GÊNESE DO
DEPÓSITO IOCG CRISTALINO, PROVÍNCIA MINERAL DE
CARAJÁS, BRASIL**

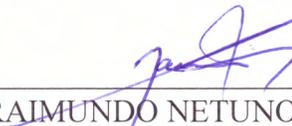
TESE APRESENTADA POR:

GUSTAVO SOUZA CRAVEIRO

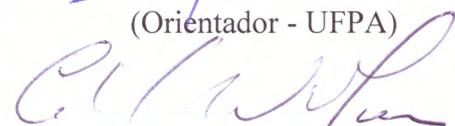
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOLOGIA**

Data da Aprovação: 22 / 10 / 2018

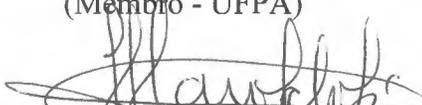
Banca Examinadora:



Prof. Dr. RAIMUNDO NETUNO NOBRE VILLAS
(Orientador - UFPA)



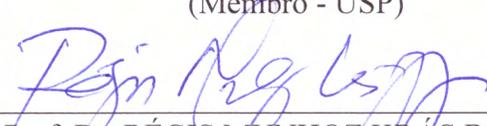
Prof. Dr. CANDIDO AUGUSTO VELOSO MOURA
(Membro - UFPA)



Prof. Dr. JOSÉ HAROLDO DA SILVA SÁ
(Membro - UFBA)



Prof. Dr^a. LENA VIRGÍNIA SOARES MONTEIRO
(Membro - USP)



Prof. Dr. RÉGIS MUNHOZ KRÁS BORGES
(Membro - UEPA)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todas as pessoas e entidades que concorreram para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, pelo fornecimento de infraestrutura e apoio financeiro;
- Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo de doutoramento. E ao INCT de Geociências da Amazônia pelo suporte financeiro;
- Ao Grupo de Metalogênese do Instituto de Geociências, pelo suporte técnico-científico;
- Ao Laboratório de Inclusões Fluidas do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em especial ao Professor Régis Munhoz Krás Borges;
- Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálises da Universidade Federal do Pará, em especial ao Professor Claudio Lamarão e à geóloga Gisele Tavares, pela presteza e aquisição de dados de química mineral.
- Ao Centro Regional para o desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Universidade Federal de Goiás, em especial ao Professor José Affonso Brod, pela presteza e aquisição de dados de química mineral.
- À geóloga Antonia Railine, pelo companheirismo, suporte técnico-científico e pelo incentivo incondicional.
- Aos meus pais, pelo alicerce e amor incomensurável.
- Ao professor Roberto Xavier, pelo suporte técnico-científico, e pela ajuda e por ter acreditado neste projeto.
- Por fim, ao Professor Netuno Villas, pelo exemplo como professor, pesquisador e amigo. Pelo incentivo, e que, incansável, sempre esteve disponível a ajudar e nunca deixou de acreditar em mim.

“Não vemos as coisas como elas são, mas como nós somos”

(Anais Nin)

RESUMO

O depósito Arqueano de cobre-ouro Cristalino está localizado a 40 km oeste da mina do Sossego, na terminação oeste da Zona de Cisalhamento Regional Carajás, na região da Serra do Rabo. Suas rochas hospedeiras são principalmente as rochas vulcânicas máficas da Formação Parauapebas, e subordinadamente, as FFB da Formação Carajás. Trabalhos de campo, dados petrográficos apoiados por MEV-EDS, somados a análises de microsonda eletrônica e dados de inclusões fluidas e sistemática de isótopos estáveis (O, H, C e S), permitiram caracterizar um sistema hidrotermal que foi responsável pelo desenvolvimento de sucessivas zonas de alteração na rocha encaixante. O metassomatismo sódico ($650^{\circ}\text{C} \geq T > 400^{\circ}\text{C}$, and $P > 1.8 \text{ Kbar}$) formou albita quase pura, turmalina schorlítica, minerais ricos em ETRL (alanita-Ce, monazita) associados a menores quantidades de calcita e quartzo. Foi seguido por alteração cálcico-férrica penetrante, onde foram produzidas abundante actinolita ($X_{\text{Mg}} = 0.9-0.7$, com até 0,6 % em peso de Cl), alanita-Ce (com até 0,6 % em peso de Cl) e magnetita, associados a disseminação de sulfeto e a corpos de substituição similares a brecha, compostos por calcopirita-pirita-magnetita-Au (associação mineral precoce). Localmente, em substituição à assembleia cálcico-férrica ocorre Fe-edenita ($X_{\text{Mg}}=0.7 - 0.4$, Cl com até 2.9 % em peso), produto de halos restritos de alteração sódico-cálcica. De 410°C para 220°C e $1.8 \text{ Kbar} > P > 0.6 \text{ Kbar}$, assembleias de alterações anteriores foram superpostas por alterações potássica (K-feldspato, e subordinadamente biotita) e propilítica/carbonática (epidoto, clorita, calcita) nesta ordem. K-feldspato é praticamente estequiométrico, mas com elevados conteúdos de BaO (até 1,2 % em peso). Entre os minerais, clorita mostra maiores variações composicionais, parecendo ser controlada pelo tipo de rocha hospedeira, química do fluido hidrotermal e temperatura. Ambas chamosita e clinocloro ($X_{\text{Fe}}=0.4-0.8$) estão presentes, sendo a primeira variedade mais abundante. Conteúdos de cloro são, em geral, $< 0,02 \%$ em peso, sendo um pouco mais significantes em cloritas que substituem albitas com textura tabuleiro de xadrez (com até 0,06 % em peso). A associação de minério tardia (calcopirita±Au±pirita±hematita) é contemporânea com as alterações potássica e propilítica, gerando evidências de que o sistema Cristalino evoluiu para os estágios finais com o aumento da fugacidade de oxigênio. O fluido mineralizante foi quente ($>550^{\circ}\text{C}$), hipersalino e quimicamente próximo ao sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{CO}_2\pm\text{MgCl}_2\pm\text{FeCl}_2$. Salinidades excederam 55.1% em peso equiv. de NaCl nos estágios precoces, mas diminuiu progressivamente para 7,9 % em peso equiv. de NaCl a partir de 250°C após a incursão de água superficial no sistema. Inicialmente enriquecido de ^{18}O e depletado em D ($\delta^{18}\text{O}_{\text{vsmow}}$

=+9,7 para +6,5 ‰; $\delta D_{\text{VSMOW}} = -30,8$ para $-40,2$ ‰) e possivelmente derivado de fontes magmáticas, o fluido se tornou depletado em ^{18}O e enriquecido em D ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +5,57$ to $-0,28$ ‰; $\delta D_{\text{VSMOW}} = -19,15$ to $-22,24$ ‰) como resultado de diluição causada pela mistura com água meteórica. Valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ para calcita de veios e brechas ($-6,5$ para $-3,8$ ‰) são consistentes com fontes profundas de CO_2 , provavelmente liberadas de câmaras magmáticas subjacentes. Valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ para calcopirita mostram uma estreita variação ($+1,6$ para $+3,5$ ‰) e indicam reservatórios homogêneos para o enxofre, certamente de origem ígnea. Embora a maioria das amostras apontam para uma filiação magmática, poucas revelam significativa influência de rochas sedimentares em suas composições isotópicas. Principalmente transportados por complexos de cloro ($>350^\circ\text{C}$), Cu e Au precipitaram em resposta a redução de temperatura e atividade de Cl^- e aumento de pH. Um fluido aquoso e frio ($200\text{-}150^\circ\text{C}$) e menos salino ($21 - 3,1$ % em peso equiv. de NaCl) parece ter circulado na área do depósito Cristalino, sendo aprisionadas em inclusões fluidas secundárias. Apesar de desconhecida, sua origem pode ter relação com intrusões graníticas Paleoproterozoicas próximas. Em comparação com outros depósitos IOCG Arqueanos de Carajás, particularmente aqueles que jazem no setor sul do Domínio Carajás, o depósito Cristalino mostra varia similaridades enquanto a composição dos fluidos e evolução, assim como assinaturas isotópicas de sulfetos e carbonatos.

Palavras-chave: Química mineral. Inclusões fluidas. Isótopos estáveis. Depósitos IOCG. Província Mineral de Carajás. Depósito Cristalino.

ABSTRACT

The Archean Cu-Au Cristalino deposit is located 40 km east from Sossego mine in the eastern end of the regional WNW-ESW Carajás shear zone, in the Serra do Rabo region. Its host rocks are mainly the mafic volcanic rocks of the Parauapebas Formation, and subordinately the BIF of the Carajás Formation. Field-work, petrographic data seconded by SEM-EDS, in addition to microprobe analysis and fluid inclusion and stable isotope (O, H, C and S) systematics, allowed characterizing a hydrothermal system that was responsible for the development of successive alteration zones in the wall rocks. Sodic metasomatism ($650^{\circ}\text{C} \geq T > 400^{\circ}\text{C}$, and $P > 1.8$ Kbar) formed near pure albite, schorlitic tourmaline, REE-rich minerals (allanite-Ce, monazite) and minor calcite and quartz. It was followed by a more pervasive calcic-ferric alteration which produced abundant actinolite ($X_{\text{Mg}} = 0.9-0.7$ and up to 0.6 wt. % Cl), allanite-Ce (up to 0.6 wt. % Cl) and magnetite, associated with sulfide disseminations and replacement breccia-like bodies composed of chalcopyrite-pyrite-magnetite-Au (early ore association). Locally, Fe-edenite ($X_{\text{Mg}}=0.7-0.4$, Cl up to 2.9 wt. %) replaced calcic-ferric assemblages within restrict sodic-calcic alteration halos. From 410° down to 220° C and 1.8 Kbar $> P > 0.6$ Kbar, the previous alteration assemblages were overprinted by potassic (K-feldspar, minor biotite) and propylitic/carbonatic (epidote, chlorite, calcite) alterations, in this order. K-feldspar is practically stoichiometric, but with high contents of BaO (up to 1.2 wt. %). Chlorite shows the greatest compositional variation among all minerals and seems to have been controlled by the type of host rock, chemistry of the hydrothermal fluid and temperature. Both chamosite and clinocllore ($X_{\text{Fe}}=0.4-0.8$) are present, the former being more common. Chlorine contents are in general < 0.02 wt. % and a little more significant in chlorites that replaced chessboard albite (up to 0.06 wt. %). The late ore association (chalcopyrite \pm Au \pm pyrite \pm hematite) is contemporaneous with the potassic and propylitic alterations and bears evidence that the Cristalino system evolved to the final stages with increase in oxygen fugacity. The ore fluid was hot ($> 550^{\circ}\text{C}$), hypersaline and chemically approached by the system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{CO}_2\pm\text{MgCl}_2\pm\text{FeCl}_2$. Salinity exceeded 55.1 wt. % NaCl equiv. in the early stages but decreased progressively to 7.9 wt. % NaCl equiv. from 250° C on, after incursion of surficial water into the system. Initially ^{18}O -enriched/D-depleted ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +9.7$ to $+6.5$ ‰; $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}} = -30.8$ to -40.2 ‰) and most likely derived from magmatic sources, the fluid became relatively ^{18}O -depleted/D-enriched ($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +5.57$ to -0.28 ‰; $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}} = -19.15$ to -22.24 ‰) as result of dilution caused by mixing with meteoric water. $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ values for vein and breccia calcite (-6.5 to -3.8 ‰) are consistent with a deep

source for CO₂, which was probably released from an underlying magma chamber. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ values for chalcopyrite show narrow variation (+1.6 to +3.5 ‰) and indicate a homogeneous reservoir for sulfur, which was likely of igneous origin. Although most data point to a magmatic affiliation, a few samples reveal significant influence of sedimentary rocks on their isotope composition. Mostly transported as chloride complexes (>350°C), Cu and Au precipitated in response to decrease in temperature and Cl⁻ activity and increase in pH. An aqueous, colder (200-150° C) and less saline (21-3.1 wt. % NaCl equiv.) fluid appears to have circulated in the Cristalino deposit area, being trapped as secondary fluid inclusions. The origin is unknown, but it could be related to a nearby Paleoproterozoic granitic intrusion. The data presented here support previous interpretations that consider Cristalino as of IOCG typology. In comparison with other Archean Carajás IOCG deposits, particularly those that lie in the southern sector of the Carajás Domain, the Cristalino deposit shows many similarities regarding ore fluid composition and evolution, as well as the isotopic signature of sulfides and carbonates.

Keywords: Mineral Chemistry. Fluid Inclusion. Stable Isotopes. IOCG deposit. Carajás Mineral Province. Cristalino deposit.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

PARECER

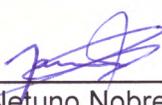
Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de GUSTAVO SOUZA CRAVEIRO

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **GUSTAVO SOUZA CRAVEIRO** orientando do Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA), composta pelos professores doutores, Lena Virgínia Monteiro (USP), José Haroldo da Silva Sá (UFBA), Régis Munhóz Kras Borges (UFPA) e Candido Augusto Veloso Moura (UFPA) após apresentação da sua tese intitulada “**GEOLOGIA, ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E GÊNESE DO DEPÓSITO IOCG CRISTALINO, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL**”, emite o seguinte parecer:

O candidato realizou sua apresentação de forma satisfatória. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. O trabalho foi apresentado na forma artigos, escritos na língua inglesa, sendo todos os três manuscritos submetidos a periódicos especializados. A tese foi considerada de bom nível e atende plenamente as exigências para uma tese de doutorado.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

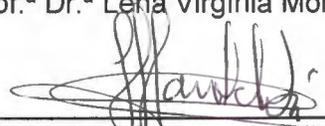
Belém, 22 de outubro de 2018.



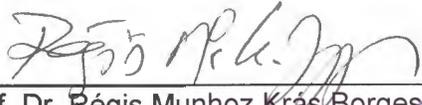
Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas (Orientador – UFPA)



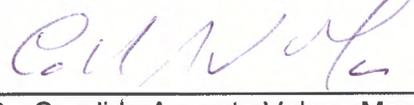
Prof.ª Dr.ª Lena Virgínia Monteiro (USP)



Prof. Dr. José Haroldo da Silva Sá (UFBA)



Prof. Dr. Régis Munhoz Kras Borges (UFPA)



Prof. Dr. Candido Augusto Veloso Moura (UFPA)