



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

TESE DE DOUTORADO Nº 139

**GEOLOGIA E METALOGÊNESE DO OURO DO
GREENSTONE BELT DA SERRA DAS PIPOCAS, MACIÇO
DE TROIA, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE-BRASIL**

Tese apresentada por:

FELIPE GRANDJEAN DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. Evandro Luiz Klein (CPRM)

**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)

C837g

Costa, Felipe Grandjean

Geologia e metalogênese do ouro do greenstone belt da Serra das Pipocas, Maciço de Troia, Província Borborema, NE-Brasil / Felipe Grandjean Costa. — 2018
xii, 226 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. Evandro Luiz Klein

1. Geocronologia. 2. Greenstone Belt. 3. Paleoproterozoico. 4. Ouro Orogênico. 5. Província Borborema.
I. Klein, Evandro Luiz, *orient.* II. Título

CDD 553



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



**GEOLOGIA E METALOGÊNESE DO OURO DO
GREENSTONE BELT DA SERRA DAS PIPOCAS,
MACIÇO DE TROIA, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE-
BRASIL**


TESE APRESENTADA POR:

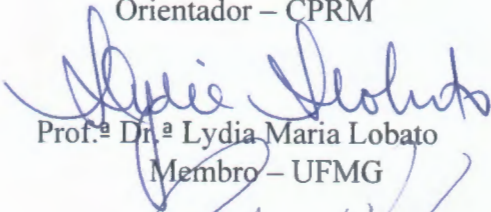
FELIPE GRANDJEAN DA COSTA

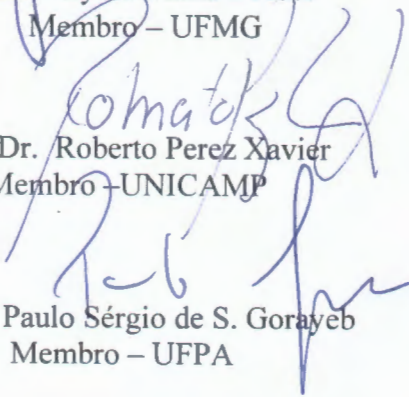
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOLOGIA**

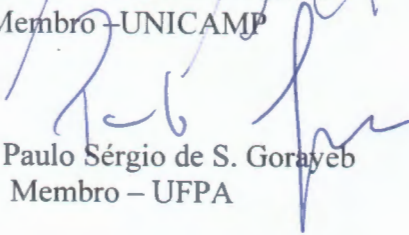
Data de Aprovação: 13 / 12 / 2018

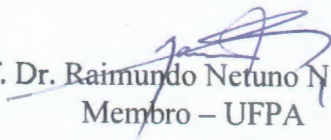
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Evandro Luiz Klein
Orientador – CPRM


Prof.ª Dr.ª Lydia Maria Lobato
Membro – UFMG


Prof. Dr. Roberto Perez Xavier
Membro – UNICAMP


Prof. Dr. Paulo Sérgio de S. Gorayeb
Membro – UFPA


Prof. Dr. Raimundo Neruno N. Villas
Membro – UFPA

Para Helena e Isabela

Papai ama vocês

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que emana toda sua energia cósmica do reino das possibilidades. Nada é por acaso neste “mundo”, tudo é quântico. Pense positivo.

Agradeço ao meu empregador Serviço Geológico do Brasil, conhecido também como Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), pelo suporte financeiro e incentivo (liberação) para esta pesquisa. Agradeço ao Antônio Maurilio (enquanto coordenador executivo em Fortaleza), por todo apoio na tramitação burocrática deste doutorado, a Joseneusa pelo apoio na Câmara Técnico–Científica da CPRM e ao Prof. Dr. Roberto Ventura, que enquanto diretor do Departamento de Geologia e Recursos Minerais da CPRM deliberou autorização para este doutorado. Agradeço também aqueles que me acompanham dia a dia na residência de Fortaleza e/ou me acompanharam durante memoráveis trabalhos de campo no sertão do Ceará, incluindo meus amigos(as) geólogos(as) Tércyo Pinéo, Bruno Calado, Edney Palheta, Caê Ganade, João Naleto, Iramaia Braga e Wanessa Souza (laboratório).

Agradeço ao meu orientador Evandro Luiz Klein que articulou tudo (*sequência tipo greenstone + mineralização aurífera + amostras de testemunho = doutorado*) e me fez o convite para desenvolvimento desta Tese, e embora nossa comunicação tenha sido geralmente por email, devido à distância geográfica (orientador em Brasília, eu em Fortaleza), ele sempre se mostrou amigo e profissional em todas as correspondências, sempre finalizando com palavras de incentivo (*ex. “go ahead”*). Valeu Evandro, *many thanks!!!*

Em 2016 tive o prazer de morar na capital paraense, Belém, para obtenção dos créditos (aulas) necessários e utilização de laboratórios. Na CPRM de Belém agradeço todo apoio de Lúcia Travassos (enquanto GEREMI), Marcelo Vasquez (MEV), Rosalva (laboratório) e Cesinha (que me cedeu um canto da sala). Na UFPA, agradeço ao apoio dos professores do PARA–ISO Jean M. Lafon, Candido Moura e Marco A. Galarza. Ao Prof. Régis Munhoz pelas proveitosas discussões nas aulas de inclusões fluidas e mineralizações em granitos, e aos meus colegas de pós–graduação Rafael Corrêa–Lima, Marcos Teódulo (Paraíba) e João Milhomen pela agradável companhia e “algumas cervejas”. Agradeço também ao apoio técnico de Gisele Marques (MEV), Joelma Lobo (lâminas) e Cleida (da secretaria da PPGG).

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa (203250/2017–6) de doutorado sanduíche no exterior, na Universidade de Cape Town (UCT), África do Sul. Agradeço a orientação do Prof. Dr. Chris Harris durante (jan–jul de 2018) a obtenção de isótopos estáveis no laboratório da UCT, e também todo o apoio e amizade de Sherissa Roopnarain, geóloga e técnica do laboratório.

Agradeço a Jaguar Mining Inc. pela disponibilização dos testemunhos de sondagem, pois sem estas amostras, grande parte deste trabalho não seria exequível.

Agradeço aos membros da banca, professora Lydia Lobato (UFMG) e professores Roberto Xavier (UNICAMP), Paulo Gorayeb (UFPA) e Netuno Villas (UFPA) por aceitarem fazer parte do processo de avaliação desta Tese.

Eu como um bom Campineiro, criado nos arredores da Cidade Universitária, no Bairro do Guará, não posso deixar de agradecer aos meus amigos e professores da UNICAMP, Ticiano (Tirci), Elson Paiva (Elsão), Roberto Xavier (Robertinho) e meu grande amigo de graduação Prof. Wagner Amaral (Lobinho), por todo apoio e incentivo desde os primórdios de minha formação geacadêmica. Neste contexto, agradeço também a todos aqueles que participaram e ajudaram de alguma maneira nesta minha missão geológica pelo mundo, seja na graduação (UNICAMP), no mestrado (UNICAMP), na CPRM e no doutorado (UFPA). Obrigado a todos! Ninguém faz nada sozinho.

Agradeço a minha esposa Tatiana e minhas filhas Helena (9 anos) e Isabela (7 anos), por todo amor e apoio em casa, e por toda paciência durante nossas andanças por Belém (2016) e África do Sul (2018). Valeu!! Papai já vai sair do computador.

Por fim, agradeço aos meus pais Vivaldo Fernando da Costa e Dorthé Grandjean da Costa, por tudo, sempre. Amo vocês.

RESUMO

O Maciço de Troia representa um dos principais domínios de embasamento arqueano/paleoproterozoico da Província Borborema, NE-Brasil, compondo-se principalmente de terrenos granito-*greenstone* riacianos e gnaisses TTGs de idades neoarqueanas. Os *greenstone belts* paleoproterozoicos do Maciço de Troia compartilham idades, características litoestratigráficas e mineralização aurífera, com aspectos similares de outros *greenstone belts* riacianos dos crátons adjacentes. Uma idade U-Pb em zircão de 2185 ± 4 Ma foi obtida para metatonalito pré-colisional (tonalitos Mirador) com afinidade geoquímica semelhante à adakitós. Para plutons potássicos colisionais (Suíte Bananeira) obteve-se as idades U-Pb em zircão de 2079 ± 4 Ma para um quartzo monzonito deformado e 2068 ± 5 Ma para um granito equigranular menos deformado. Ambos são cálcio-alcalinos de alto-K, derivados da fusão parcial de fonte crustal. As idades modelo Hf em zircão de todos os granitoides variam entre 2800 e 2535 Ma, evidenciando que componentes de crosta arqueana contribuíram para a gênese do magmatismo. No entanto, zircões herdados com c. 2.3 Ga mostraram valores de $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ de c. +4,9, indicando que crosta paleoproterozoica menos radiogênica (juvenil) também participou como fonte de magma. A mineralização de ouro no *greenstone belt* da Serra das Pipocas está associada a zona de cisalhamento, e a principal área mineralizada (o depósito de Pedra Branca) se estabeleceu no limite estratigráfico da unidade metavulcânica máfica e metassedimentar da sequência *greenstone*. O estágio principal da mineralização aurífera é encontrado em associação com veios de quartzo, alteração cálcio-silicática (diopsídio, feldspato potássico, anfibólio, titanita, biotita, pirita, albita, magnetita \pm carbonatos) e albitização (albititos). Ouro livre comumente se precipita em estreita associação espacial com magnetita e teluretos de ouro e prata. Duas assembleias de inclusões fluidas foram identificadas em veios de quartzo associados à alteração cálcio-silicática. A assembleia 1 é caracterizada por trilhas pseudo-secundárias que mostram a coexistência de três tipos de inclusões fluidas (aquosas, aquo-carbônicas e carbônicas), sugerindo formação durante a separação de fases (imiscibilidade de fluidos). A intersecção das isócoras médias para inclusões aquosas e carbônicas coexistentes sugere condições de PT de 495°C e 2.83 kbar (10.5 km de profundidade), semelhante a condições de PT de depósitos de ouro orogênico hipozonal. A assembleia 2 é representada por inclusões fluidas secundárias, aquosas e de baixa temperatura ($T_h < 200^\circ\text{C}$), provavelmente não relacionadas à mineralização aurífera. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$, δD e $\delta^{13}\text{C}$ dos minerais hidrotermais (quartzo, calcita, biotita, hornblenda e magnetita) evidenciam valores de $\delta^{18}\text{O}$ do fluido variando de +8,3 a +11,0 ‰ (n=59), δD do fluido de -98 a -32‰ (n=24) e valores de $\delta^{13}\text{C}$ de calcita de -6,35 a -9,40 ‰ (n=3). A

geotermometria por isótopos de oxigênio em pares de quartzo–magnetita forneceu temperaturas de 467 a 526°C (n=7, média de 503°C), que provavelmente, representa a temperatura de deposição de ouro. A associação de ouro com magnetita e teluretos sugere um fluido formador de minério proveniente de magmas oxidados, semelhante àqueles interpretados como “depósitos de ouro orogênico relacionado a intrusões oxidadas”, comumente descrito em outros *greenstone belts* pré-cambrianos (ex., Abitibi e Eastern Goldfields). Quatro eventos de deformação (Dn, Dn+1, Dn+2 e Dn+3) são reconhecidos no *greenstone belt* da Serra das Pipocas. O evento Dn é responsável pela foliação Sn, paralela ao acamamento (So) da pilha metavulcanossedimentar. O evento Dn+1 é caracterizado pela foliação Sn+1, de mergulho principal para SE, sendo plano-axial a uma série de dobras assimétricas que evidenciam transporte tectônico para NW. O evento Dn+2 representa a fase de deformação transcorrente e o evento Dn+3 é caracterizado por deformação dúctil–rúptil. O estágio principal da mineralização de ouro é encontrado em veios de quartzo deformados, associados à alteração de alta temperatura (cálcio–silicática e albitização), no entanto, ocorrência de ouro (\pm Te, Ag) em estruturas Dn+3 (dúctil–rúptil) também foi observada. Uma idade U–Pb em titanita de 2029 ± 28 Ma foi obtida para a alteração de cálcio–silicática (e mineralização de ouro). No entanto, a forte perda de Pb dos grãos de titanita define uma idade de 574 ± 7 Ma no intercepto inferior da linha discórdia, evidenciando metamorfismo neoproterozoico. A idade U–Pb em zircão de 575 ± 3 Ma para diques sin–tectônicos à deformação Dn+3, sugere que a deformação progressiva (Dn+1, Dn+2 e Dn+3) é provavelmente de idade Neoproterozoica, com tensor de compressão máxima (σ_1) na direção WNW–ESE. No entanto, em escala local, registros de deformação paleoproterozoica (Dn) ainda estão preservados. Como modelo genético para o depósito de ouro de Pedra Branca, é sugerido aqui, uma mineralização de ouro orogênico controlada por dois estágios de exumação tectônica; (1) mineralização de ouro orogênico hipozonal ocorreu em c. 2029 Ma, após pico do metamorfismo de alto grau e durante primeira exumação tectônica da sequência *greenstone*, e, posteriormente, em c. 575 Ma, (2) mineralização aurífera tardia (remobilização?) ocorreu em nível crustal mais raso, durante o segundo estágio de exumação tectônica, associado à orogênese Brasileira/Pan–Africana.

Palavras–chave: Geocronologia. *Greenstone Belt*. Paleoproterozoico. Ouro Orogênico. Província Borborema.

ABSTRACT

At the Archean–Paleoproterozoic Troia Massif, in Borborema Province, NE–Brazil, two major Paleoproterozoic greenstone belts are recognized (Algodões and Serra das Pipocas). These share similar ages and lithostratigraphic characteristics with other 2.2–2.1 Ga greenstone belts of the surrounding cratonic domains (e.g. Guiana shield and São Luis–West Africa craton), and also host gold mineralization. In this thesis, a U–Pb zircon age of 2185 Ma was obtained for a pre–collisional metatonalite (Mirador tonalites) with geochemical affinity similar to adakites–like rocks. For syn– to post–collisional potassic plutons (Bananeira suite) we obtained U–Pb zircon ages of 2079 Ma for a deformed quartz monzonite and of 2068 Ma for the less–deformed equigranular granite. These granitoids of the Bananeira suite are both of high–K calc–alkaline affinity, and probably derived from partial melting of crustal sources. Zircon Hf crustal model ages of all granitoids range between 2800 and 2535 Ma, indicating that Archean crustal components contributed to their magma genesis. However, two analyzed c. 2.3 Ga old inherited zircon grains showing $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of c. +4.9, indicate that crustal reworking of less–radiogenic Paleoproterozoic sources also participated. Gold mineralization in the Serra das Pipocas greenstone belt is associated with a regional NE–trending shear zone. The mineralized areas (the Pedra Branca gold deposit) are located near–parallel to the stratigraphy, siting on shear zones, between metavolcanic and metasedimentary unit boundaries. The main stage of gold mineralization is found in association with quartz veins, high–temperature calc–silicate alteration (diopside, K–feldspar, amphibole, titanite, biotite, pyrite, albite, magnetite \pm carbonates) and albitization. Free–milling gold commonly precipitates in close association with magnetite and gold/silver tellurides. Two fluid inclusion assemblages were identified in mineralized quartz veins. Assemblage 1 is characterized by pseudo–secondary trails that show the coexistence of CO₂–rich and low salinity (0 to 8 wt% NaCl equiv.) CO₂–H₂O–NaCl and H₂O–NaCl inclusions, suggesting formation during phase separation (fluid immiscibility). The mean isochores intersection of CO₂–rich and H₂O–NaCl inclusions of assemblage 1 suggests PT conditions of 495 °C and 2.83 kbar (c. 10.5 km depth), akin to hypozonal orogenic gold deposits. Assemblage 2 is represented by late secondary low–temperature (Th<200°C) H₂O–NaCl inclusions, probably unrelated to gold mineralization. The $\delta^{18}\text{O}$, δD and $\delta^{13}\text{C}$ values of hydrothermal minerals (quartz, calcite, biotite, hornblende and magnetite) define fluid $\delta^{18}\text{O}$ values ranging from +8.3 to +11.0‰ (n=59), fluid δD from -98 to -32‰ (n=24) and $\delta^{13}\text{C}$ values of calcite from -6.35 to -9.40‰ (n=3). Oxygen isotope thermometry for quartz–magnetite pairs gave temperatures from 467 to 526°C (n=7, average 503°C), which probably represents the temperature of gold deposition.

The association of gold with magnetite and tellurides strongly suggests an ore-forming fluid sourced by oxidized magmas, similar to those interpreted as 'orogenic oxidized intrusion-related gold deposits' in other Precambrian greenstone belts (e.g. Abitibi and Eastern Goldfields). Four deformation events (D_n , D_{n+1} , D_{n+2} and D_{n+3}) are recognized in the Serra das Pipocas greenstone belt. The D_n event is responsible for the early S_n foliation, parallel to bedding (S_0) of the greenstone pile. The D_{n+1} event is characterized by a pervasive, southeasterly-dipping S_{n+1} foliation that is axial-planar to a number of asymmetric, tight to isoclinal and recumbent folds. The D_{n+2} event represents a transcurrent deformation phase and the late D_{n+3} event is characterized by ductile-brittle deformation. The main stage of gold mineralization is found as deformed quartz veins and associated high-temperature alteration, but some lower temperature gold (\pm Te, Ag) occurrence along the late stage brittle structures (D_{n+3} event) is also observed. The U-Pb titanite age of 2029 ± 28 Ma for the high-temperature calc-silicate alteration (and gold mineralization) is presented here. However, the strong Pb loss of titanite grains defines a 574 ± 7 Ma lower intercept age, evidencing that early gold mineralization were broadly affected by Neoproterozoic deformational events and metamorphism (Brasiliano/Pan-African orogeny). The U-Pb zircon age of 575 ± 3 Ma for syn-tectonic diques bracketed the age of late D_{n+3} deformation event. Then, the progressive deformation recorded (D_{n+1} , D_{n+2} and D_{n+3}) is probably of Neoproterozoic age, with the maximum compressive stress (σ_1) in the WNW-ESE direction. However, at local scale, Paleoproterozoic deformation records (D_n) still preserved. The genetic model for the Pedra Branca gold deposit is suggested here by a two-stage exhumation-drive gold mineralization; represented by a (1) early oxidized hypozonal orogenic gold mineralization (main stage) that occurred at c. 2029 Ma, shortly after the high-grade Paleoproterozoic metamorphism and first exhumation processes of the greenstone pile, and later on, at c. 580 Ma, a (2) late gold mineralization (remobilization?) occurred at shallow levels (second exhumation process) associated to late Neoproterozoic Brasiliano/Pan-African orogeny.

Keywords: Geochronology. Greenstone Belt. Paleoproterozoic. Orogenic Gold. Borborema Province.



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

FELIPE GRANDJEAN DA COSTA

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **FELIPE GRANDJEAN DA COSTA** orientando do Prof. Dr. Evandro Luiz Klein (UFPA/CPRM), composta pelos professores doutores Lydia Maria Lobato (UFMG), Roberto Perez Xavier (UNICAMP), Paulo Sergio de Sousa Gorayeb (UFPA), e Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA) após apresentação do projeto de tese intitulado “**GEOLOGIA E METALOGÊNESE DO OURO DO GREENSTONE BELT DA SERRA DAS PIPOCAS, MACIÇO DE TROIA, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE-BRASIL**”, emite o seguinte parecer:

O candidato realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e segura no tempo estipulado. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma de agregação de artigos científicos, um já publicado, e atende as exigências básicas para uma tese de doutorado.

Considerando a qualidade da tese e os critérios adotados pelo PPGG, a banca a aprova com distinção, outorgando o título de Doutor. Pelo exposto a banca aprova a tese de doutorado candidato **FELIPE GRANDJEAN DA COSTA**.

Belém, 13 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. Evandro Luiz Klein (UFPA/CPRM)


Profa. Dra. Lydia Maria Lobato (UFMG)


Prof. Dr. Roberto Perez Xavier (UNICAMP)


Prof. Dr. Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb (UFPA)


Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA)