

Petrologia e isótopos de Sm-Nd da formação ferrífera bandada anfibolítica de Cristália (Minas Gerais-Brasil)

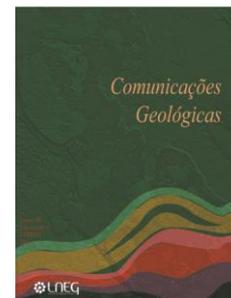
Petrology and Sm-Nd isotopes of the amphibolitic banded iron formation from Cristália (Minas Gerais-Brazil)

A. O. Chaves^{1*}, C. C. Porcher², J. V. Alves³

Recebido em 15/10/2015 / Aceite em 12/01/2017

Disponível online em fevereiro de 2017 / Publicado em dezembro de 2017

© 2016 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP



Artigo original
Original article

Resumo: Uma formação ferrífera bandada (FFB) anfibolítica, de granulação fina e coloração verde e vermelha, com faixas verde-escuras (ricas em Fe-horneblenda, almandina, magnetite e algum quartzo) e, às vezes, verde-claras (com grunerite, almandina, quartzo e magnetite), é encontrada na região de Cristália (MG-Brasil). Os dados de química mineral obtidos em microsonda eletrônica suportaram a utilização de diagramas de fase dos sistemas CFMASH e MnCFMASH, os quais permitiram inferir que o metamorfismo sofrido pela FFB ocorreu em condições mínimas de facies anfibolito, sob pressão de 3,5 kbar e temperatura por volta de 600 °C. Assumindo-se que os porfiroblastos de granada foram formados no pico do metamorfismo progressivo gerador da FFB anfibolítica de Cristália e que a granada (GRT) se formou em equilíbrio com o reservatório isotópico (rocha total, RT) a partir do qual ela se formou, foi obtida uma idade Sm-Nd isocrônica (RT-GRT) de 2018 +/- 130 Ma possivelmente correspondente a este pico metamórfico. Sugere-se aqui que tal metamorfismo esteja associado a um processo orogénico regional, cuja dinâmica teria promovido a inversão de uma bacia oceânica onde o protólito da FFB teria se depositado. O valor de $\epsilon_{Nd(0)}$ fortemente negativo (-27,3) para a FFB anfibolítica de Cristália sugere aporte de material terrígeno da área fonte continental, de idade TDM média de 3200 Ma, para o interior da bacia marinha onde seu protólito sedimentou.

Palavras-chave: Cristália (Brasil), formação ferrífera bandada anfibolítica, metamorfismo, Sm-Nd.

Abstract: A fine grained green and red amphibolitic banded iron formation (BIF), with dark green bands (rich in Fe-hornblende, almandine, magnetite and some quartz) and sometimes light green ones (with grunerite, almandine, quartz and magnetite) is found in Cristália (MG-Brazil) region. Mineral chemistry data obtained from electron microprobe supported the use of phase diagrams of the CFMASH and MnCFMASH systems, which allowed determining that metamorphism undergone by such rock would have occurred in minimum conditions of amphibolite facies, under 3.5 kbar and about 600 °C. Assuming that the garnet porphyroblasts have been formed during the metamorphic peak which generated the amphibolitic BIF of Cristália and that garnet (GRT) is in equilibrium with the isotopic reservoir (whole rock, WR) from which it formed, a Sm-Nd isochron (WR-GRT) age of 2018 +/- 130 Ma possibly corresponding to this metamorphism has been found. It is suggested here that this metamorphism is associated with a regional orogenic process, the dynamics of which would have led to the inversion of an ocean basin where the BIF protolith would have deposited. The strongly negative value of $\epsilon_{Nd(0)}$ (-27.3) for the BIF suggests supply of terrigenous material from a continental source area, with average TDM age of 3200 Ma, into the marine basin where its protolith sedimented.

Keywords: Cristália (Brazil), amphibolitic banded iron formation, metamorphism, Sm-Nd.

¹ Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa - Departamento de Geologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antonio Carlos, 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Laboratório de Geologia Isotópica/CPGq, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Caixa Postal 941, CEP 30123-970, Belo Horizonte, MG, Brasil.

*Autor correspondente/Corresponding author: alex2010@ufmg.br

1. Introdução

Formações ferríferas bandadas (FFB's) ocorrem no pré-câmbrio a partir de 3800 Ma. O volume global das FFB's atinge um máximo a cerca de 2500 Ma e elas desaparecem do registro geológico por volta de 1800 Ma, apenas reaparecendo entre 800 e 600 Ma. As FFB's aparentemente correspondem ao resultado de processos químicos de deposição em bacias oceânicas, sendo o ferro e o silício provenientes de atividade hidrotermal no assoalho oceânico, com sua precipitação ocorrendo a partir da interação destes fluidos quentes com a água do mar (Bekker *et al.*, 2010).

A mineralogia das FFB's menos metamorfizadas consiste em combinações dos seguintes minerais: chert, magnetite, hematite, carbonatos (mais comumente siderite e membros da série dolomite-ankerite), greenalite, stilpnomelano, riebeckite e localmente pirite. Os campos de estabilidade Eh-pH destes minerais indicam condições anóxicas para o ambiente original de deposição (Klein, 2005). O metamorfismo progressivo de FFB's produz sequencialmente Fe-anfíbolos, Fe-piroxenas e, ao final, assembléias contendo Fe-olivina num grau mais alto. Tais reações metamórficas são isoquímicas, exceto a descarbonatação e desidratação (Klein, 2005).

Segundo Deer *et al.* (1997) e Zeh *et al.* (2005), anfíbolos da série de solução sólida cummingtonite-grunerite predominantemente ocorrem, juntamente com quartzo, clorite, hornblenda, granada, plagioclase, clinó- e ortopiroxena, olivina, siderite, ankerite, magnetite, hematite e ilmenite, em FFB's de médio a alto grau metamórfico.

Encontrada na região de Cristália-MG, uma rocha de granulação fina e coloração verde e vermelha, bandada, basicamente constituída por Fe-anfíbolos, além de Fe-granada, magnetite e quartzo, aparentemente constitui uma FFB

anfíbolítica de médio a alto grau metamórfico. O objetivo do presente trabalho é apresentar e discutir aspectos da petrologia desta FFB do norte de Minas Gerais, com suporte não só em dados geológicos, macro e micropetrográficos e de química mineral, como também na estimativa das condições de P e T a que foi submetida durante o metamorfismo. A idade deste metamorfismo é aqui apresentada usando dados isotópicos de Sm-Nd dos porfiroblastos de granada e da rocha total da FFB de Cristália, dados estes que revelam ainda as características da fonte de seu respectivo protólito.

2. Aspectos geológicos regionais

A área de estudo encontra-se inserida na borda oeste da faixa orogênica Araçuai, desenvolvida no evento Brasiliano entre 650-480 Ma (Alkmim *et al.*, 2006). Esta faixa mostra vergência estrutural para oeste em direção ao Craton São Francisco, este último recoberto por coberturas neoproterozoicas (Grupo Bambuí) e fanerozoicas (Alkmim *et al.*, 2006). No entorno de Cristália, as unidades geológicas regionais distribuem-se segundo faixas alongadas paralelamente a N-NE e de largura variável (Fig. 1). Compreendem rochas gnáissicas e graníticas pré-Espinhaço, coberturas proterozoicas (Supergrupo Espinhaço e Grupo Macaúbas), além de depósitos detrítico-coluvionares (Terciário) e aluviões recentes.

O substrato cristalino arcaico do qual foi coletada a rocha estudada neste trabalho (Fig. 1 – coordenadas UTM da formação ferrífera bandada anfíbolítica: 8.140.000 S/723.604 E e 8.148.000 S/724.200 E, WGS84-23S), é representado por gnaisses de granulação fina a média, ricos em plagioclase cálcica e quartzo, geralmente com estrutura bandada bem desenvolvida e feições de migmatização locais (Siga Jr., 1986). Os protólitos do tipo Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito (TTG) destes gnaisses cristalizaram-se a cerca de 3400 Ma (Silva *et al.*, 2016). Junto aos gnaisses, ocorrem também corpos metaultramáficos, geralmente com anfíbolitos associados, e sequências metavulcanosedimentares. Para este conjunto de gnaisses bandados, metamafitos e metaultramafitos, e rochas metavulcanosedimentares, Silva *et al.* (2016) adotam a designação Complexo Porteirinha. O Complexo Porteirinha é intruído ainda por rochas plutônicas ácidas a intermediárias pré-Espinhaço da suíte neoarcaica Rio Itacambiruçu (2660 Ma - Silva *et al.*, 2016) e das suítes paleoproterozoicas Paciência (alcalina de assinatura pós-colisional com 2050 Ma - Silva *et al.*, 2016) e Catolé (anorogênica com 1800 Ma - Bersan *et al.*, 2015). Localmente, observam-se zonas de cisalhamento, com centímetros até metros de largura, subverticais, com foliação milonítica anastomosada, atingindo todos os litotipos pré-Espinhaço.

A Unidade Inferior do Supergrupo Espinhaço, de idade stathérica, repousa sobre as rochas do Complexo Porteirinha, por vezes como uma superfície de falha de descolamento basal. É constituída por quartzitos e metaconglomerados diamantíferos (Oliveira *et al.*, 1997). A Unidade Superior é composta por quartzitos finos a médios, às vezes com sericite e hematite. As rochas do Supergrupo Espinhaço (Fig. 1) apresentam mergulho suave a moderado, para leste. Interpreta-se que a Unidade Inferior depositou-se em ambiente fluvial, localmente com alta energia. A Unidade Superior teria se sedimentado, também, em ambiente fluvial, apresentando depósitos de planície de inundação locais (Oliveira *et al.*, 1997).

Em grande parte da região do entorno de Cristália ocorre o Grupo Macaúbas (Fig. 1), de idade Neoproterozoica, localmente subdividido, segundo Oliveira *et al.* (1997), nas formações Rio

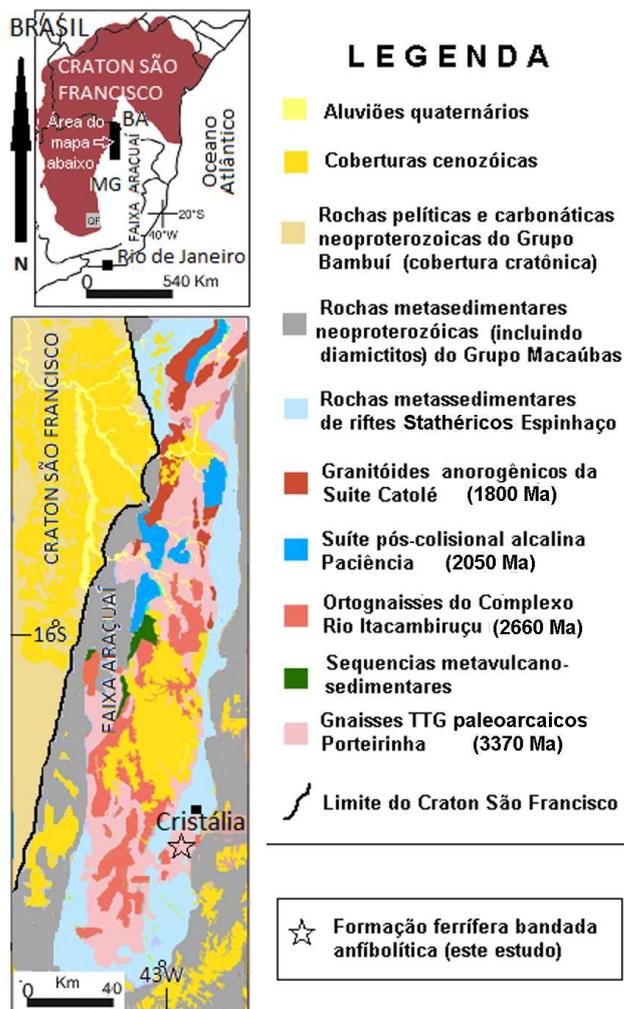


Figura 1. Enquadramento geológico da região onde foi coletada a formação ferrífera bandada anfíbolítica investigada (modificado de Silva *et al.*, 2016 e CPRM, 2014). MG – Estado de Minas Gerais, BA – Estado da Bahia, QF – Quadrilátero Ferrífero.

Figure 1. Geological background of the amphibolitic banded iron formation from Cristália (modified after Silva *et al.*, 2016 and CPRM, 2014). MG – State of Minas Gerais, BA – State of Bahia, QF – Iron Quadrangle (Quadrilátero Ferrífero).

Peixe Bravo, basal (quartzitos impuros, micáceos ou ferruginosos, com raras lentes de metaconglomerado e camadas de filito), Nova Aurora (metadiamicritos de matriz xistosa ou quartzosa, com intercalações de quartzito ferruginoso) e Chapada Acauã (biotite xistos, xistos carbonáticos, quartzito, metadiamicrito, intercalações quartzíticas a filíticas ferruginosas) e, no topo, Salinas (micaxistos feldspáticos ou não e rochas calciossilicatadas). O contato do Grupo Macaúbas com o Complexo Porteirinha e com o Supergrupo Espinhaço caracteriza-se como falha de descolamento basal. Oliveira *et al.* (1997) sugerem que as rochas da Formação Rio Peixe Bravo depositaram-se em ambiente fluvial, as da Formação Nova Aurora em ambiente glácio-marinho proximal, as da Formação Chapada Acauã, em ambiente glácio-marinho distal e as da Formação Salinas, em ambiente marinho turbidítico. Segundo estes autores, as rochas Macaúbas organizam-se segundo dobras amplas, com planos axiais mergulhando suavemente para leste, formadas durante a Orogenia Brasiliana ocorrida entre 650-480 Ma atrás, contemporânea à amalgamação do supercontinente Gondwana.

3. Materiais e métodos

Com o intuito de investigar a petrogênese da formação ferrífera bandada anfibolítica de Cristália, foram empreendidas atividades de reconhecimento geológico local e coleta de amostras, seguidas por confecção de seções delgadas polidas para estudos micropetrográficos/imagemamento em microscópio de luz polarizada e para microanálises/imagemamento dos seus minerais por microsonda eletrônica JEOL, modelo JXA-8900 do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), através de espectrometria por dispersão de comprimento de onda (WDS). Os padrões analíticos empregados nas microanálises foram das Coleções Astimex e Ian Steele. A fórmula química média destes minerais foi alcançada a partir das planilhas de Locock (2008; 2014). A partir das fórmulas químicas dos minerais, estimativas termobarométricas foram obtidas em seções *T versus Fe/(Fe+Mg)* calculadas no sistema CFMASH (CaO–FeO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O) e pseudoseções *P versus T* calculadas no sistema MnCFMASH e delineadas com a composição da granada, seções estas produzidas por Zeh *et al.* (2005) em material geológico petrográfica e quimicamente similar.

Os isótopos de Sm e Nd em concentrados de granada e rocha-total (RT) foram obtidos no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e utilizados em combinação para estabelecer uma isócrona interna de dois pontos. A amostra de RT foi moída em gral de calcedônia ao tamanho de grão menor que 200 mesh (75 µm). O concentrado de granada foi preparado utilizando técnica padrão de moagem combinada com líquidos densos e catação manual de grãos opticamente livres de inclusões, posteriormente seguindo o mesmo processo de dissolução da amostra de RT. Ambas amostras foram pesadas e foi adicionado traçador com ¹⁵⁰Sm–¹⁴⁹Nd antes da dissolução em potes de Teflon usando mistura de ácidos concentrados (HF + HNO₃ + HCl). Após a completa dissolução, os ETRs de cada amostra foram separados utilizando colunas com resina de troca catiônica AG50W-X8 (200–400 mesh) e o Sm foi separado do Nd com colunas com resina de troca aniônica LN-B50-A (100 a 200 µm). Os dados isotópicos foram adquiridos utilizando espectrômetro de massa por ionização termal com multi-coletor (TIMS) VG54E Sector, cujos detalhes analíticos, bem como a rotina de dissolução está descrita em detalhe em Gioia e Pimentel (2001). Incertezas sobre as razões Sm/Nd e ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd foram consideradas melhores que ± 0,1 % (1σ) e ± 0,00001 (1σ), respectivamente, baseado em repetição de análises do padrão BHVO-1. As razões de Neodímio foram corrigidas para fracionamento durante análise por normalização para uma razão ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd de 0,7219. Os cálculos de regressão utilizaram uma constante de decaimento λ¹⁴⁷Sm de 6,53974×10⁻¹²/a⁻¹ (Lungmair e Marti, 1978). Os dados brutos foram reduzidos utilizando macros Excel produzidas no LGI. O valor da idade modelo de depleção mantélica (TDM) para amostra de rocha-total foi calculada utilizando modelo de DePaolo (1981). A idade isocrônica Sm/Nd em granada – RT foi calculada com o ISOPLOT 3.0 (Ludwig, 2003).

4. Resultados

4.1. Petrografia e química mineral da FFB anfibolítica de Cristália

A formação ferrífera bandada anfibolítica estudada é assim denominada pela notável e majoritária presença de anfíbolos (minerais predominantes) esverdeadas, com magnetite

disseminada. Macroscopicamente, mostra granulação fina, com bandas de espessura centimétrica verde-escuras (predominantes), e às vezes verde-claras, ambas ricas em porfiroblastos milimétricos de granada vermelha (Fig. 2).

Em termos microscópicos, as bandas verde-escuras apresentam textura granoblástica e são constituídas por clinoanfíbola do tipo hornblenda (55 % vol.), de pleocroísmo em tons de verde claro a verde escuro, granada (20 % vol.) geralmente poiquiloblástica, magnetite (15 % vol.), quartzo (< 10 % vol.) e rara apatite (<1 % vol.). A figura 3A apresenta uma porção representativa das bandas escuras da FFB. A figura 3B mostra inclusões arredondadas de hornblenda, quartzo e magnetite no interior da granada poiquiloblástica, indicando o consumo ou a formação destes minerais no crescimento da granada.

Referente à banda verde-clara da FFB anfibolítica, a figura 4 apresenta a fotomicrografia (A) sob polarizadores descruzados e a respectiva imagem de elétrons retroespalhados (B) obtida na microsonda eletrônica. Assim como na banda escura, a textura é granoblástica, porém a clinoanfíbola é da série cummingtonite-grunerite, geralmente subédrica a euédrica, com fraco pleocroísmo em tons de verde pálido. Em termos modais, este anfíbola e o quartzo predominam na banda (30 % vol. cada).

A granada, que ocorre em cristais isolados e arredondados, e a magnetite (20 % vol. cada) completam a mineralogia. A apatite é rara, às vezes ausente. Nesta banda clara foram encontradas lamelas de exsolução de grunerite no interior de cristais residuais de hornblenda (Fig. 5), uma feição que, em conjunto com a forma arredondada das granadas ali presentes, sugere que a grunerite subédrica a euédrica se formou nesta banda a partir do consumo da hornblenda e da granada.

Na figura 4B, chama atenção a presença de condutos (em corte transversal) e superfícies inter- e intragranulares de percolação de “fluidos”, cujos solutos solidificados encontram-se preservados na banda clara da FFB.

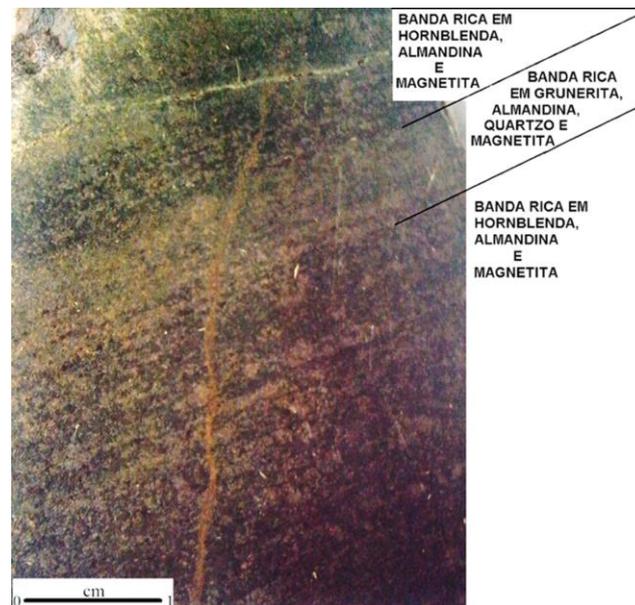


Figura 2. Aspecto em amostra de mão do bandamento da FFB anfibolítica de Cristália (MG), marcado pela alternância de bandas de espessura centimétrica verde-escuras, e às vezes verde-claras, ambas ricas em granada vermelha. A rocha mostra caráter magnético, sendo fortemente atraída por um ímã de mão em função da presença de magnetite.

Figure 2. Macroscopic feature of the amphibolitic BIF from Cristália (MG), showing centimetric bands of dark and light green colour, both garnet-rich. The rock contains magnetite crystals and it can be attracted by a hand magnet.

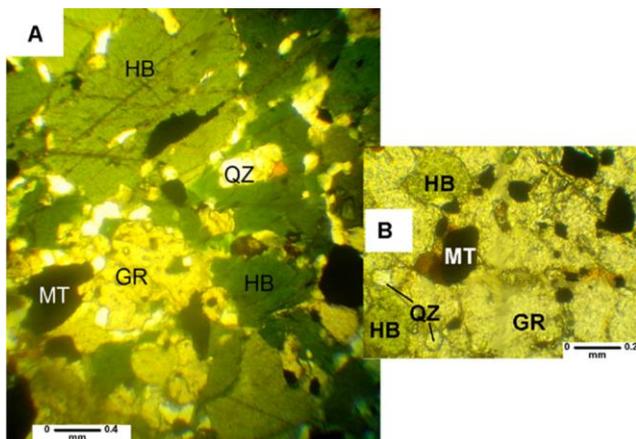


Figura 3. Fotomicrografia da banda verde escura da FFB anfibolítica estudada. A) Aspecto geral da textura e das fases que compõem a banda; B) Detalhe das inclusões minerais de hornblenda, quartzo e magnetite arredondados no interior da granada poiquiloblástica. HB - hornblenda, GR - granada, MT - magnetite, QZ - quartzo. Polarizadores descruzados.

Figure 3. Photomicrography of the dark green band from amphibolitic BIF. A) General textural aspect and mineral phases; B) Detail of the mineral inclusions of hornblende, quartz, and magnetite inside poikiloblastic garnet. HB - hornblende, GR - garnet, MT - magnetite, QZ - quartz. Uncrossed polarizers.

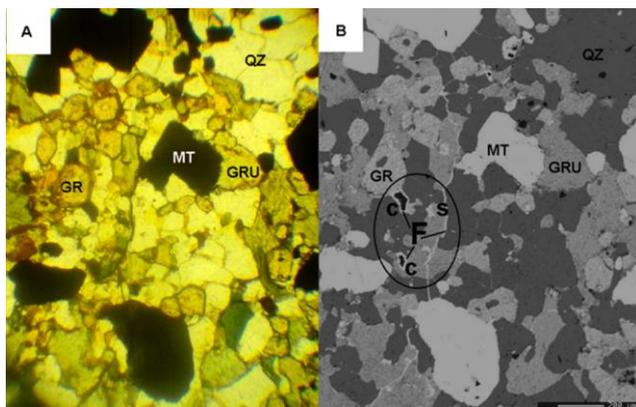


Figura 4. Fotomicrografia da banda verde clara, rica em grunerite, da FFB anfibolítica. A) sob polarizadores descruzados e B) a respectiva imagem de elétrons retroespalhados. Observa-se que o quartzo é mais abundante que na banda escura e alguns cristais residuais de hornblenda verde escura são notados. GRU - grunerite, GR - granada, MT - magnetite, QZ - quartzo, F - condutos (c) e superfícies (s) de percolação de fluidos.

Figure 4. Photomicrography of the grunerite-rich light green band of the amphibolitic BIF (A) under uncrossed polarizers and (B) its respective image of backscattered electrons. Quartz is more abundant here than in dark band and residual hornblende crystals are present. GRU - grunerite, GR - garnet, MT - magnetite, QZ - quartz, F - conduits (c) and surfaces (s) of fluid percolation.

Com relação à química mineral, foram feitas microanálises em microsonda da granada das bandas escura e clara, da clinoanfíbola da banda escura, da clinoanfíbola da banda clara e da magnetite e quartzo de ambas as bandas. Além destes minerais, foram analisadas as bordas dos condutos e as superfícies de percolação de “fluidos”, na região adjacente a cristais de quartzo (só silício e oxigênio), para se evitar mensurar elementos de outros minerais vizinhos. Os dados analíticos e as fórmulas calculadas para as espécies minerais encontram-se na tabela 1, que mostra em destaque a predominância de Fe e Si, típica de FFB's, nas fases minerais estudadas.

A granada é do tipo almandina, rica em Fe, e não mostra variações de composição entre os seus cristais nas bandas escura e clara. A clinoanfíbola das bandas escuras predominantes é do tipo Fe-hornblenda. A clinoanfíbola das discretas bandas claras, bem como das lamelas no interior da hornblenda, é

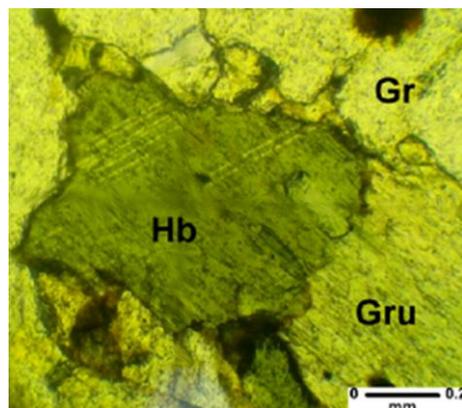


Figura 5. Fotomicrografia (polarizadores descruzados) mostrando grunerite na forma de lamelas de exsolução (linhas paralelas finas) no interior da hornblenda e na forma de cristal adjacente à granada. Hb - hornblenda, Gru - grunerite, Gr - granada.

Figure 5. Photomicrography (uncrossed polarizers) showing exsolution lamellae of grunerite inside hornblende and adjacent to garnet. Gru - grunerite, Gr - garnet, Hb - hornblende.

realmente do tipo grunerite (termo rico em Fe da série cummingtonite-grunerite, típico de FFB metamorfisadas em médio a alto grau), com teor de água aparentemente maior que da hornblenda. Seu surgimento (e possivelmente de uma população de magnetite também euédrica) se deu aparentemente a partir da Fe-hornblenda e da almandina, com sobra dos elementos Al, Ca e Na, os quais foram encontrados no “fluido” residual deste processo de substituição. A análise do “fluido” das bandas claras, como de esperado, não fechou próxima aos 100 %, pois os cerca de 23 % restantes devem representar a água não analisada pela microsonda. Sua composição remete a um complexo de hidroxifosfato-silicato de ferro que aparentemente arrastava Al, Ca e Na para fora da rocha. O quartzo é mais abundante nas bandas verde claras, o que indica que pode ter sido formado junto com a grunerite.

4.2. Termobarometria

Antes de se estimar as condições termobarométricas de formação da FFB anfibolítica de Cristália, com suporte nas seções de Zeh *et al.* (2005), é necessário conhecer o valor da razão Fe/(Fe+Mg) desta rocha. Embora não tenha sido realizada análise química de rocha total da amostra, assume-se aqui que esta razão seja obtida com base na razão Fe/(Fe+Mg) das fases minerais presentes, ponderada pela proporção modal volumétrica (50 % Fe-hornblenda, 20 % almandina, 15 % grunerite e 15 % magnetite) de cada fase (exceto quartzo) na rocha. Assim sendo e respectivamente considerando em sequência as fórmulas da hornblenda, almandina, grunerite e a magnetite da tabela 1, chega-se ao valor de $(0,70 \times 0,50) + (0,95 \times 0,20) + (0,73 \times 0,15) + (1,00 \times 0,15) = 0,8$.

A coexistência de hornblenda, granada e grunerite na FFB de Cristália, em uma rocha cujo valor da razão Fe/(Fe+Mg) é de 0,8, implica que no sistema CFMASH de Zeh *et al.* (2005), as condições termobarométricas de formação da FFB anfibolítica sejam sob pressão de 3,5 kbar e temperaturas entre 550 e 650 °C, de acordo com o diagrama da figura 6A.

Este intervalo de T se justifica em função da ausência de clorite e olivina na FFB estudada (abaixo de 550 °C apareceria Fe-clorite e acima de 650 °C surgiria olivina faialítica na rocha). A pressão certamente não é maior que 4 kbar tendo em vista que praticamente não há a coexistência de hornblenda, granada e grunerite a uma razão Fe/(Fe+Mg) de 0,8 sob 4,5 kbar, conforme a figura 6B.

Tabela 1. Química mineral da granada, das anfíbulas, magnetite, quartzo e da fase "fluida" residual solidificada da FFB anfíbolítica. As análises com a sigla BE denominação são da banda escura, enquanto as amostras com a sigla BC são da banda clara. A fórmula dos minerais foi calculada na base de: granada, 12 oxigênios (segundo Locock, 2008); anfíbola, 23 oxigênios (segundo Locock, 2014). A fórmula química determinada com base na média composicional de cada fase mineral está apresentada na base da tabela abaixo das análises dos respectivos minerais.

Table 1. Mineral chemistry of the garnet, amphiboles, magnetite, quartz, and of the residual solidified fluid phase of the BIF (BE = dark green band, BC = light green band). Mineral formula has been calculated as follows: 12 oxygens to garnet (after Locock, 2008) and 23 oxygens to amphiboles (after Locock, 2014).

GRANADA																	
No.	GR- BE1	GR- BE2	GR- BE3	GR- BE4	GR- BE5	GR- BC1	GR- BC2	GR- BC3	GR- BC4	média							
SiO ₂	36,03	37,84	37,91	36,63	36,67	36,12	36,79	38,24	38,71								
TiO ₂	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,04	0,06								
Al ₂ O ₃	22,06	20,8	21,06	21,13	22,66	21,31	21,29	19,38	19,73								
FeO	24,00	24,2	24,47	24,11	24,53	24,96	24,65	24,95	24,53								
MnO	9,29	10,13	9,82	9,54	10,11	9,57	9,40	9,19	8,99								
MgO	0,70	0,92	0,73	0,74	0,84	0,61	0,56	0,66	0,73								
CaO	7,19	6,60	6,80	6,46	6,74	6,45	6,44	6,03	7,47								
Na ₂ O	0,04	0,09	0,06	0,06	0,04	0,02	0,03	0,04	0,07								
Total	99,34	100,62	100,86	98,69	101,6	99,06	99,16	98,52	100,38								
Fórmula mineral média	(Fe _{1,70} Mn _{0,68} Ca _{0,57} Mg _{0,10})Al ₂ (SiO ₄) ₃ - Almandina (Alm ₅₆ Sps ₂₂ Grs ₂₀ Pl ₂)																
CLINOANFÍBOLA DA BANDA ESCURA																	
No.	HB- BE1	HB- BE2	HB- BE3	HB- BE4	HB- BE5	HB- BE6	HB- BE7	HB- BE8	HB- BE9	HB- BE10	HB- BE11	HB- BE12	HB- BE13	HB- BE14	HB- BE15	HB- BE16	média
SiO ₂	50,1	47,68	48,58	47,54	49,09	49,15	47,61	50,05	48,77	50,51	51,32	49,98	50,50	50,05	50,73	50,93	49,54
TiO ₂	0,28	0,31	0,27	0,40	0,31	0,40	0,36	0,35	0,25	0,26	0,08	0,18	0,16	0,09	0,13	0,02	0,24
Al ₂ O ₃	5,54	6,92	6,94	6,75	7,15	7,00	6,59	7,48	6,56	6,36	5,19	5,66	5,48	5,57	5,22	5,75	6,26
FeO	24,1	24,88	23,70	24,16	24,46	24,34	25,17	24,76	24,44	23,18	25,01	24,61	24,12	24,02	25,64	25,54	24,51
MnO	0,77	0,64	0,69	0,85	0,95	0,88	0,65	0,81	0,66	0,59	0,95	0,92	0,74	0,98	0,98	0,81	0,80
MgO	5,44	6,94	6,81	6,20	5,91	5,87	5,38	5,32	5,83	5,49	6,29	6,01	6,30	6,89	6,36	6,01	6,06
CaO	9,50	10,38	9,06	9,70	9,65	9,93	10,38	9,28	9,53	9,87	8,44	8,71	8,93	8,64	8,33	8,62	9,31
Na ₂ O	0,60	0,79	0,59	0,76	0,88	0,82	0,77	0,95	0,64	0,80	0,75	0,74	0,97	0,69	0,66	0,73	0,76
Total sem H ₂ O	96,5	98,53	96,63	96,35	98,38	98,39	96,90	98,99	96,67	97,06	98,02	96,80	97,21	96,94	98,04	98,40	97,48
Fórmula mineral média	(Ca _{1,515} Na _{0,224} Fe _{0,158} Mn _{0,103})(Fe _{2,955} Mg _{1,372} Al _{0,645} Ti _{0,027})(Si _{7,524} Al _{0,476})O ₂₂ (OH) ₂ - Ferro-Hornblenda																
CLINOANFÍBOLA DA BANDA CLARA																	
No.	GRU- BC1	GRU- BC2	GRU- BC3	GRU- BC4	GRU- BC5	GRU- BC6	GRU- BC7	GRU- BC8	GRU- BC9	GRU- BC10	GRU- BC11	GRU- BC12	GRU- BC13	média			
SiO ₂	51,46	50,05	50,12	49,86	49,83	50,85	52,64	50,98	50,21	49,83	51,22	49,52	50,25	50,52	50,52		
TiO ₂	0,00	0,04	0,02	0,01	0,10	0,07	0,00	0,03	0,05	0,15	0,02	0	0,05	0,04			
Al ₂ O ₃	0,78	0,91	0,94	1,04	1,20	1,42	1,30	0,93	1,25	1,07	1,05	1,05	1,67	1,12			
FeO	33,28	34,42	34,02	34,27	34,40	33,36	33,91	33,82	34,71	35,40	32,47	33,65	34,44	34,01			
MnO	1,66	1,70	1,62	1,71	1,83	1,93	1,52	1,52	1,64	1,73	1,65	1,78	1,39	1,67			
MgO	7,01	7,10	6,87	7,38	7,01	7,65	6,24	7,65	6,66	6,49	8,51	8,6	6,97	7,24			
CaO	1,03	1,37	1,65	1,30	1,55	1,31	1,56	1,43	1,74	1,28	1,38	1,32	1,04	1,38			
Na ₂ O	0,20	0,22	0,15	0,16	0,15	0,19	0,23	0,17	0,28	0,17	0,26	0,22	0,37	0,21			
Total sem H ₂ O	95,42	95,82	95,39	95,71	96,06	96,78	97,41	96,53	96,54	96,11	96,55	96,14	96,17	96,2			
Fórmula mineral média	(Fe _{1,470} Ca _{0,234} Mn _{0,224} Na _{0,064})(Fe _{3,088} Mg _{1,707} Al _{0,200} Ti _{0,005})Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂ - Grunerite																
SOLUTO SOLIDIFICADO DO "FLUIDO" NA BANDA CLARA																	
No.	F-BC-1	F-BC-2	F-BC-3	F-BC-4	média		MAGNETITE		QUARTZO								
SiO ₂	6,32	5,84	4,32	12,34	7,21	1,25	99,04										
TiO ₂	0,05	0,02	0,14	0,00	0,05	0,17	0,02										
Al ₂ O ₃	2,20	2,14	2,31	2,23	2,22	0,23	0,11										
FeO	61,25	64,11	66,34	50,38	60,52	96,94	0,34										
MnO	0,08	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,00										
MgO	0,10	0,05	0,35	0,40	0,22	0,03	0,01										
CaO	2,09	0,25	0,32	1,64	1,08	0,08	0,08										
Na ₂ O	0,10	0,06	0,14	0,16	0,11	0,07	0,01										
P ₂ O ₅	5,34	4,28	5,03	8,36	5,75	-	-										
Total sem H ₂ O	77,52	76,79	79,00	75,57	77,21	98,82	99,60										

Lançados nas pseudoseções *P versus T* construídas por Zeh *et al.* (2005) no sistema MnCFMASH e delineadas com a proporção de almandina (Fig. 6C) e essartite (Fig. 6D) da granada, os valores de X_{alm} de 56 % e X_{sps} de 22 % (Tab. 1) da granada da FFB de Cristália confirmam condições de formação sob pressões de 3,0-3,5 kbar e temperaturas entre 550-650 °C. Estas *P* e *T* equivalem às condições mínimas de fácies anfíbolito, ou seja, a

FFB de Cristália teria se formado em condições de médio a alto grau de metamorfismo.

A coexistência de Fe-hornblenda, granada, grunerite, magnetite e quartzo nestas condições ampara-se nos dados do quadro (Tab. 2) de Klein (2005) para formações ferríferas bandadas estudadas em todo o mundo.

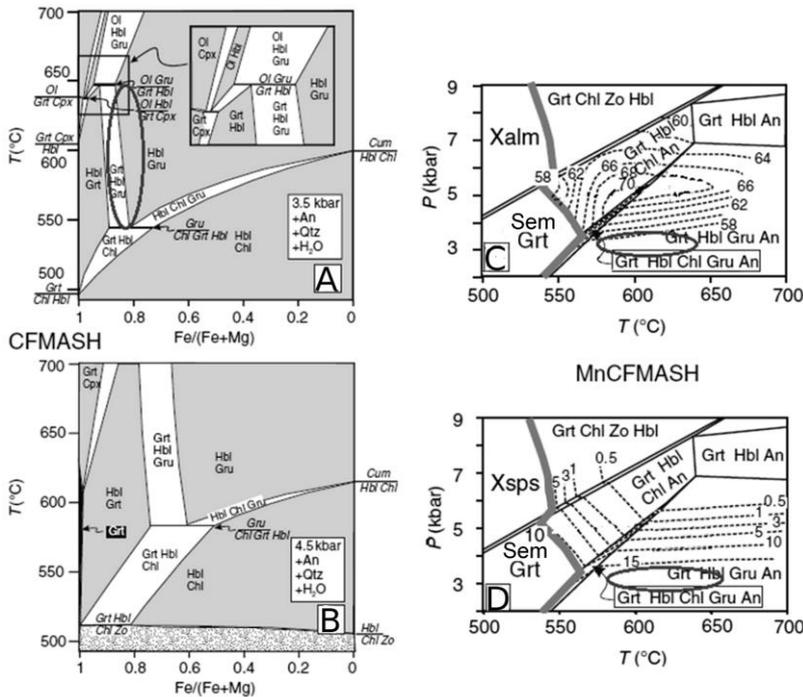


Figure 6. Comparação dos dados de química mineral da FFB de Cristália com pseudoseções aplicáveis a formações ferríferas bandadas (Zeh et al., 2005). A) Pseudoseção Fe/(Fe+Mg) versus T (°C) no sistema CFMASH a 3,5 Kbar; B) 4,5 Kbar. Pseudoseções T (°C) versus P (Kbar) no sistema MnCFMASH, delineadas pela proporção de almandina (Xalm); C) e da espessartita (Xsps); D) em granadas. As elipses demarcam as condições estimadas para a FFB de Cristália. Ol - olivina, Cpx - clinopiroxena, Grt - granada, Hbl - hornblenda, Gru - grunerite, Chl - clorita, An - anortita, Qtz - quartzo, Zo - zoisite.

Figure 6. Comparison of the mineral chemistry data of the BIF from Cristália with pseudosections used to BIF from Zeh et al., (2005). A) Pseudosection Fe/(Fe+Mg) versus T (°C) in the system CFMASH at 3,5 Kbar; B) 4,5 Kbar. Pseudosections T (°C) versus P (Kbar) in the system MnCFMASH, outlined by the proportion of almandine (Xalm); C) and spessartine (Xsps) (D) in garnets. Ellipses delimits the considered conditions to the BIF from Cristália. Ol - olivine, Cpx - clinopyroxene, Grt - garnet, Hbl - hornblende, Gru - grunerite, Chl - chlorite, An - anortite, Qtz - quartz, Zo - zoisite.

4.3. Isótopos de Sm-Nd

Estudos realizados por Beukes (1983) revelam que o sistema isotópico Sm-Nd rocha total de formações ferríferas não é modificado por processos metamórficos. Com base nessa constatação, análises Sm-Nd foram buscadas no presente trabalho para dar suporte às investigações petrológicas. Na tabela 3 encontram-se os resultados das análises isotópicas Sm-Nd feitas em granada e em rocha total da FFB de Cristália. Assumindo-se que os porfiroblastos de granada sejam formados no pico do metamorfismo progressivo gerador da FFB anfíbolítica de Cristália e que a granada esteja em equilíbrio com o reservatório isotópico (rocha total) do qual ela se formou, a partir do diagrama de isócrona interna ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd versus ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd uma idade de 2018 +/- 130 Ma correspondente a este metamorfismo é encontrada (Fig. 7). O valor de ε_{Nd(0)} para a rocha total é fortemente negativo (-27,3) e a idade modelo TDM calculada para a rocha total é de 3200 Ma.

5. Discussões e conclusões

Em termos da geologia regional, a proximidade da FFB anfíbolítica de Cristália a quartzitos ferruginosos e a metadiamicitos e xistos com intercalações de quartzitos e metapelitos ferruginosos neoproterozoicos regionais do Grupo Macaúbas poderia sugerir que o protólito da FFB estudada tivesse a mesma idade das rochas deste grupo. Entretanto, com base na idade paleoproterozoica encontrada para o metamorfismo da FFB estudada, fica descartada sua correlação genética com os litotipos ferruginosos do Grupo Macaúbas.

Segundo Alkmim e Marshak (1998), toda a borda sudeste do Craton São Francisco, incluindo a região do Complexo Porteirinha onde a FFB de Cristália se situa, foi afetada por uma Orogênese de idade Riacciana-Orosiriana. Sugere-se aqui que o metamorfismo da FFB decorrido há 2018 +/- 130 Ma em condições mínimas de fácies anfíbolito estaria associado a esta orogênese, cuja dinâmica teria promovido a inversão de uma bacia oceânica onde o protólito da FFB de Cristália teria se

Tabela 2. Estabilidade relativa de minerais presentes em formações ferríferas bandadas em função do grau metamórfico (Klein, 2005).

Table 2. Relative stability of the minerals found in BIF in function of the metamorphic grade (Klein, 2005).

	GRAU DE METAMORFISMO		
	BAIXO	MÉDIO	ALTO
DIAGENÉTICO			
Inicial			
Tardio			
chert → quartzo			
"Fe ₃ O ₄ .H ₂ O" → magnetite			
"Fe(OH) ₃ " → hematite			
greenalite			
stilpnomelano			
ferri-annite			
talco-minnesotaita			
Fe-clorite (ripidolite)			
dolomite - ankerite			
calcite			
siderite - magnesite			
riebeckite			
cummingtonite-grunerite (antofilita)			
tremolite-ferroactinolite (hornblenda)			
almandina			
ortopiroxena			
clinopiroxena			
faialite			

Tabela 3. Resultados das análises isotópicas Sm-Nd feitas em granada e em rocha total da FFB de Cristália. Os valores de $\epsilon_{Nd(0)}$ e da idade modelo TDM para a rocha total são também apresentados.

Table 3. Garnet and whole rock Sm-Nd data of the BIF from Cristália. $\epsilon_{Nd(0)}$ and TDM model age values for whole rock are also shown.

Amostra	Lab No.	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	Erro	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Erro	$\epsilon_{Nd(0)}$	T DM (Ga)
FFB (Granada)	2253	1,0961	4,0411	0,163980	0,061566	0,511738	0,006400	-	-
FFB (Rocha Total)	2256	1,7661	8,4608	0,126199	0,080000	0,511236	0,001500	-27,3	3,2

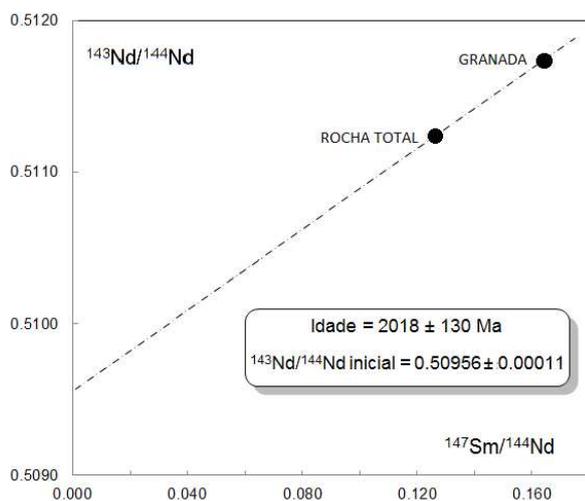


Figura 7. Diagrama isocrônico $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ para a FFB de Cristália.

Figure 7. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isochron diagram for the BIF from Cristália.

depositado. Tal cenário geológico encontra-se registrado no Supergrupo Minas exposto no sul do Craton São Francisco, na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, onde itabiritos anfibolíticos com grunerite são encontrados juntamente com itabiritos comuns e itabiritos dolomíticos, cujos protólitos foram depositados por volta de 2450 Ma e metamorfosados há 2050 Ma (Rosiere e Chemale Jr., 2000). Assim, uma possível correlação entre a FFB anfibolítica de Cristália e os itabiritos anfibolíticos do Supergrupo Minas poderia ser estabelecida.

Estudos isotópicos Sm-Nd efetuados por Alexander *et al.* (2008) em formações ferríferas de 2900 Ma mostram que a água do mar ao longo de margens cratônicas era dominada por Nd derivado de fontes continentais. O valor de $\epsilon_{Nd(0)}$ fortemente negativo (-27,3) para a FFB anfibolítica de Cristália sugere aporte de material terrígeno continental da área fonte, com idade modelo T_{DM} Sm-Nd de 3200 Ma, para o interior da bacia marinha onde seu protólito sedimentou. Esta idade modelo é consistente com a idade de 3400 Ma dos gnaisses TTG que encaixam a FFB de Cristália.

Klein (2005) avalia que os minerais “primários” mais comuns em FFB ricas em silicatos são stilpnomelano [filossilicato rico em Fe - $(\text{K},\text{Na})(\text{Fe}^{2+}\text{MgFe}^{3+})_8\text{Si}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{24}(\text{OH})_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$], siderite/ankerite [carbonato - $\text{Ca}(\text{Fe}^{2+},\text{Mg},\text{Mn})(\text{CO}_3)_2$], chert/quartzo (SiO_2), magnetite (Fe_3O_4), e raros fosfatos, os quais estariam dispostos de modo intercalado em finas camadas ao sofrerem diagênese em bacias sedimentares marinhas. Possuindo Ca, Fe, Mg, Al, Si, além Mn e moléculas de água, os referidos minerais seriam candidatos ideais a fazer parte do protólito precursor da FFB de Cristália, tendo em vista que seus elementos químicos nela ocorrem. De acordo com os dados de $\epsilon_{Nd(0)}$ aqui

apresentados para a FFB de Cristália, é sugerido que argilo-minerais como montmorillonites (esmetites) derivadas do intemperismo de fonte continental possivelmente representada pelos gnaisses TTG do Complexo Porteirinha também fariam parte do referido protólito formado em bacia marinha. Com relação à possível sequência de reações químicas que levaram a atual associação mineralógica da FFB estudada, apoiada nas feições de micropetrografia anteriormente descritas, enumeram-se sugestivamente:

1) Formação da Fe-Horneblenda (metamorfismo progressivo):

Stilpnomelano + Ankerite + Montmorillonite + Quartzo + Magnetite (+/- Fosfato) =

Fe-Horneblenda +/- Apatite + CO_2

2) Formação dos Porfiroblastos da Almandina (pico metamórfico):

Fe-Horneblenda + Magnetite = Almandina + Quartzo

3) Formação da Grunerite (possível metamorfismo regressivo):

Fe-Horneblenda + Almandina (+/- Apatite) = Grunerite + Quartzo + Magnetite + Fluidos com Al, Ca e P

Durante a formação da Fe-horneblenda em metamorfismo progressivo seguida pelo surgimento dos porfiroblastos de almandina no pico metamórfico (reações 1 e 2), é possível supor que teria eventualmente ocorrido uma desconfiguração do bandamento original do protólito sedimentar da FFB. O bandamento atualmente verificado na FFB seria, por sua vez, metamórfico e decorrente do surgimento da grunerite (reação 3, durante possível retrometamorfismo), crescida na rocha em faixas específicas verde-claras que se diferenciam das verde-escuras ricas em Fe-horneblenda e almandina.

As condições de P e T inferidas em 3,0-3,5 kbar e 550-650 °C para o metamorfismo que gerou a FFB de Cristália estão próximas aos valores mínimos de P e T encontrados nas FFB's anfibolíticas tratadas por Zeh *et al.* (2005) e são semelhantes também aos inferidos para FFB's similares, submetidas às mesmas condições de médio a alto grau metamórfico, investigadas por outros autores (p. ex. Kimball e Spear, 1984).

Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida ao primeiro autor. À estudante de Geologia Carolina Bueno Menezes pelo apoio em campo. Agradecimentos ao Geólogo Matheus Belloni pela preparação das amostras para análise isotópica e ao Prof. Dr. Edinei Koester pela discussão dos dados isotópicos.

Referências

- Alexander, B. W., Bau, M., Andersson, P., Dulski, P., 2008. Continentally-derived solutes in shallow Archean seawater: rare earth element and Nd isotope evidence in iron formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **72**: 378–394.
- Alkmim, F. F., Marshak, S., 1998. The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region. *Precambrian Research*, **90**: 29-58.
- Alkmim, F. F., Marshack, S., Pedrosa-Soares, A. C., Peres, G. G., Cruz, S. C. P., Whittington, A., 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogeny in Brazil and Africa: nutcracker tectonics during the neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, **49**: 43-64.
- Bekker, A., Slack, J. F., Planavsky, N., Krapež, B., Hofmann, A., Konhauser, K. O., Rouxel, O. J., 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **105**: 467-508.
- Bersan, S. M., Danderfer Filho, A., Abreu, F., Costa, A. F. O., 2015. Granitogênese esteriana no contexto norte da Faixa Araçuaí: a suíte Catolé. In: *Geosudeste 2015*, Anais, Campos do Jordão – Brasil.
- Beukes, N. J., 1983. Palaeoenvironmental setting of iron-formations in the depositional basin of the Transvaal Supergroup, South Africa. In: Trendall, A. F., Morris, R. C. (Eds.), *Iron-formation Facts and Problems. Developments in Precambrian Geology* (Ed. B. F. Windley), Elsevier, Amsterdam, **6**: 131-198.
- CPRM, 2014. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais – 1:1 000 000. Download - Arquivos Mapas em PDF – Mapas Geológicos Estaduais. Disponível em <<http://geobank.cprm.gov.br>>. Acesso em: 15 de julho 2016.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J., 1997. *Rock Forming Minerals, Volume 2B, Double Chain Silicates*. 2nd edition. London, The Geological Society, 784.
- DePaolo, D. J., 1981. Radiogenic isotopes and crustal evolution. In: O'Connell, R. J., Fyfe, W. S. (Eds.), *Evolution of the Earth: Geodynamics Series*, American Geophysical Union, **5**: 59-68.
- Gioia, S. M. C. L., Pimentel, M. M., 2000. The Sm–Nd isotopic method in the Geochronology Laboratory of the University of Brasília. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **72**: 219-245.
- Kimball, K. L., Spear, F. S., 1984. Metamorphic petrology of the Jackson County Iron Formation, Wisconsin. *Canadian Mineralogist*, **22**(4): 605-619.
- Klein, C., 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, **90**(10): 1473-1499.
- Locock, A. J., 2008. An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets. *Computers and Geosciences*, **34**(12): 1769-1780.
- Locock, A. J., 2014. An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA2012 recommendations. *Computers and Geosciences*, **62**: 1-11.
- Ludwig, K. R., 2003. Isoplot 3.0 – A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkley Geochronology Center, Special Publications* **4**: 74
- Lungmair, G., Marti, K., 1978. Lunar initial ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd: differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **35**: 273-284.
- Oliveira, M. J. R., Grossi-Sad, J. H., Romano, A. W., Lobato, L. M., 1997. Geologia da Folha Grão Mogol. In: Grossi-Sad, J. H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares, A. C., Soares-Filho, B. S. (Eds.). *Projeto Espinhaço em CD-ROM (textos, mapas e anexos)*. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, 611-713. 1 CD-ROM.
- Rosiere, C. A., Chemale Jr. F., 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. *Geonomos*, **8**(2): 27-43.
- Siga Jr., O., 1986. *A evolução geotectônica da porção nordeste de Minas Gerais, com base em interpretações geocronológicas*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 140.
- Silva, L. C., Pedrosa-Soares, A. C., Armstrong, R. P., Magalhães, J. T. R., Pinheiro, M. A. P., Santos, G. G., 2016. Disclosing the Paleoproterozoic to Ediacaran history of the São Francisco craton basement: The Porteirinha domain (northern Araçuaí orogen, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 50-67.
- Zeh, A., Holland, T. J. B., Klemd, R., 2005. Phase relationships in grunerite-garnet-bearing amphibolites in the system CFMASH, with applications to metamorphic rocks from the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, **23**(1): 1-17.