

EVOLUÇÃO GEOQUÍMICA DOS FLUIDOS MINERALIZANTES DO BERILO NO PEGMATITO LAVRA DA GENEROSA, CAMPO PEGMATÍTICO DE SABINÓPOLIS, MINAS GERAIS

Newman Carvalho D.T.de¹, Bello R.M.S.², Gandini A.L.¹, Fernandes M.L.S.³, Marciano V.R.P.R.O.⁴

Univ. Fed. de Ouro Preto, Esc. Minas, Dep. Geologia, daniela@degeo.ufop.br, gandini@degeo.ufop.br;² Univ. São Paulo, Inst. Geoc., rosabell@usp.br;³ Univ. Fed. Minas Gerais, CPMTG, lourdes@geoligc.ufmg.br;⁴ Museu de Mineralogia Professor Djalma Guimarães, museumin@pbh.gov.br

ABSTRACT

The *Lavra da Generosa* pegmatite is situated in the eastern part of the State of Minas Gerais, Eastern Brazilian Pegmatite Province, Pegmatitic District de Santa Maria de Itabira, Sabinópolis Field. This work shows the physicochemical and optical characteristics of 12 beryl samples (varieties aquamarine, morganite and goshenite). The physicochemical characteristics of mineralizing fluids were determined by microthermometric studies of the crystals. The beryl type evolution from transition (NT) to normal (N) was obtained from c_o/a_o ratio determined from X-ray diffraction. FTIR data permitted the characterization of the fluid components, as CO_2 , CH_4 and H_2O types I and II. The density (2,64 as 2,70) and the refractive index data [n_o (1,574 to 1,584); n_e (1,583 to 1,590)] were given by physical tests. The beryl crystals contain a great number of three-phase inclusions and rarely one-phase, two-phase, multiphase inclusions, which are primary, pseudo-secondary and secondary in origin, composed basically of aquocarbonic solutions. By means of the temperatures of the eutectic, it was possible to characterize a physicochemical evolution for the fluids, ranging from aqueous solutions (low salinity), containing Na^+ , K^+ , besides Fe^{2+} and Fe^{3+} , Al^{3+} , Zn^{2+} and Ca^{2+} , to CO_2 bearing water solutions (high salinity), rich in Al^{3+} , Zn^{2+} and Li^+ .

Key Words: fluid inclusions, geochemistry, pegmatite.

INTRODUÇÃO

A região do Vale do Rio Doce, em especial a de Sabinópolis (Minas Gerais), destaca-se pela presença de pegmatitos, que contêm variedades gemológicas de berilo, conhecidos como grandes produtores de minerais industriais, como berilo, feldspato, mica, etc.

Dando continuidade aos estudos desenvolvidos por Marciano (1995), são discutidos, neste trabalho, além das propriedades físicas e químicas dos cristais de berilo, os dados microtermométricos que permitiram determinar as características físico-químicas dos fluidos mineralizantes. Estes foram obtidos por meio do estudo de inclusões fluidas (10 a 50 μm , comprimento no maior eixo) presentes em 30 regiões referentes a 20 lâminas, confeccionadas a partir de 12 cristais de berilo. Os cristais estudados (variedades água-marinha, morganita e goshenita) pertencem ao corpo pegmatítico Lavra da Generosa, situado na porção oriental do estado de Minas Gerais, na Província Pegmatítica Oriental do Brasil, Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, Campo Pegmatítico de Sabinópolis.

A lavra da Generosa localiza-se a 19 km da cidade de Sabinópolis, na localidade de Kilombo. O acesso à região se dá, partindo de Belo Horizonte, pela rodovia BR-120, até Santa Maria de Itabira e por estradas vicinais pavimentadas até os municípios de Guanhães e Sabinópolis. A lavra é conhecida como importante produtora de feldspato industrial (cerâmica), gemas e amostras de coleção. As investigações já efetuadas na área enfatizaram, principalmente, aspectos geoquímicos das rochas e minerais, tais como mica, feldspato, nióbio-tantalatos, etc, havendo, portanto, a necessidade de estudos mais detalhados.

CONTEXTO GEOLÓGICO

O Pegmatito da Generosa encontra-se encaixado em rochas Arqueanas pertencentes à Província Mantiqueira, com idade U-Pb de 3.130 ± 8 Ma (Machado *et al.*, 1996). Trata-se de uma região clássica de ocorrências de recursos minerais, destacando-se, além dos feldspatos, berilo industrial, micas, quartzo, nióbio-tantalatos e gemas variadas. Essa região insere-se no contexto da Faixa de Dobramentos Araçuai, localizando-se na porção sudeste do Cráton do São Francisco, integrando a Província Mantiqueira.

A geologia da região de Sabinópolis, é dominada por rochas gnáissicas bandadas ortoderivadas, correspondentes a granitóides do tipo TTG, guardando registros geocronológicos de colagens orogênicas sobrepostas, desde o Arqueano até o Neoproterozóico. Tais litologias são atribuídas à Suíte Guanhães (Grossi Sad, 1997).

Localmente, as litologias da Suíte Guanhães estão recobertas por rochas supracrustais, representadas por xistos, formações ferríferas, mármore e quartzitos, pertencentes ao Grupo Guanhães (Fig. 1) (Grossi Sad, 1997).

Todo o conjunto é cortado por rochas granitóides da Suíte Borrachudos, a qual tem sido descrita como uma suíte anorogênica, intrudida no fim do Paleoproterozóico e relacionada à abertura do *rift* Espinhaço (Fernandes, 2001). Esses granitos foram, em grande parte, afetados pela deformação brasileira (600 - 500 Ma). Os minerais constituintes são microclínio perfitico, quartzo, albita, annita ($\pm$ hastingsita $\pm$ muscovita), além de zircão, allanita, titanita, apatita, fluorita e magnetita. Trata-se de granitos metaluminosos, subalcalinos, enriquecidos em FeO , relativamente ao MgO e em cátions de alta carga.

Granitóides do tipo Borrachudos, integrantes do Corpo São Félix constituem a encaixante imediata do Pegmatito da Generosa.

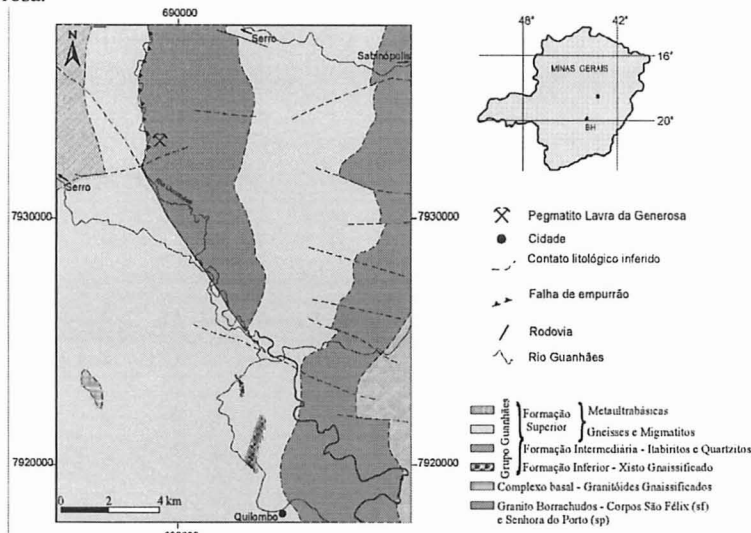


Figura 1 – Mapa Geológico da região do Pegmatito Lavra da Generosa (adaptado de Marciano *et al.*, 2000).

O PEGMATITO LAVRA DA GENEROSA

O Pegmatito Lavra da Generosa é o maior corpo da região, apresentando 200 m de comprimento por 5 a 10 m de espessura. Possui forma tabular, exibindo, ainda, ramificações com atitudes discordantes, e apresenta reações feldspáticas na zona de contato com a encaixante.

Trata-se de um pegmatito zonado simples, embora nem todas as zonas possam ser observadas, sendo característica a transição abrupta entre as zonas marginal e a intermédia.

A zona marginal é caracterizada por possuir poucos centímetros de espessura (5 a 20 cm), sendo constituída, basicamente, por plagioclásio sódico e muscovita. A zona intermediária é composta, em sua porção mais externa, por albita, muscovita e cristais centimétricos de fluorita violeta e verde. Já na sua porção mais interna, constitui-se de feldspato potássico (róseo e verde - amazonita), quartzo, berilo (água-marinha, morganita, goshenita e heliodoro), monazita, nióbio-tantalatos (ferrocolumbita, Ta-columbita e samarskita) e espessartita. O núcleo não foi identificado. As unidades ou corpos de substituição são de ocorrência freqüente e apresentam-se sob a forma de cavidades preenchidas por cristais euédricos de albita sacaroidal, muscovita e topázio azul.

MATERIAIS E MÉTODOS

As análises dos cristais selecionados foram realizadas por meio de quatro metodologias distintas. Os parâmetros de cela unitária foram calculados a partir de dados gerados pelos difratogramas de raios X obtidos pelo método do pó em uma mistura de berilo com 10% de NaCl, em um difratômetro *Shimadzu*, modelo XRD6000, equipado com tubo de Co e filtro de Fe, disponível no DEGO/EM/UFOP. A densidade relativa foi determinada por meio de uma balança analítica eletrônica, da marca *BEEngineering*, modelo Marck 210A, com precisão de 0,0001g, pertencente ao LGQA/DEGO/EM/UFOP. Para a determinação dos índices de refração, foi utilizado um refratômetro para sólidos *Rayner*, pertencente ao laboratório de Gemologia do DEGO/EM/UFOP. As análises de FTIR foram realizadas no CECOR/EBA/UFMG, em um espectrômetro da marca *Bomen/Hartmann & Braun*, modelo MB 100C23, com detector MCT, utilizando-se de uma célula de diamante, modelo SPG 466. Os estudos petrográficos das inclusões foram desenvolvidos em microscópios petrográficos binoculares de marca *Leitz Wetzlar*, com oculares de 10x e 25x e objetivas de 3,5x, 10x e 32x/UT50. Os estudos microtermométricos foram executados em platinas de marca CHAIXMECA, acopladas aos microscópios petrográficos. Foram inicialmente observadas 30 regiões de 20 fragmentos de cristais, totalizando o estudo de, aproximadamente, 320 inclusões. Os estudos foram realizados nos laboratórios de Inclusões Fluidas do DEGO/EM/UFOP e do IGc/USP.

PROPRIEDADES FÍSICAS E CRISTALOQUÍMICAS

Os cristais de berilo ocorrem na zona intermediária e nos corpos de substituição. Geralmente apresentam-se translúcidos ou amarelo-esverdeados, devendo-se destacar a presença de um cristal zonado sendo rosado nas bordas e incolor no centro, embora os de qualidade gemológica possuam colorações azuladas (água-marinha) e amareladas (heliodoro). Os 12 cristais amostrados possuem comprimentos variando de 3,5 cm a 17 cm e espessuras de 1,5 cm a 15 cm, sendo 8 de hábito prismático hexagonal com terminação em pinacóide.

Sabe-se que as propriedades físicas do berilo variam em função do seu quimismo, havendo uma correlação positiva entre o teor de álcalis na estrutura do mineral e os valores de densidade, índice de refração (n_o e n_e) e birrefringência.

As análises da densidade dos cristais de berilo forneceram valores compreendidos entre 2,64 (cristais de coloração verde azulada) e 2,70 (cristal zonado).

No que se refere aos índices de refração, o n_o apresentou valores entre 1,583 e 1,590, enquanto que o n_e apresentou valores entre 1,574 e 1,584. Os maiores valores de n_e (1,584) e n_o (1,590) referem-se à amostra zonada (morganita e goshenita), bem como a maior birrefringência ($\approx 0,010$). Os demais cristais apresentaram birrefringência variando de $\approx 0,005$ a $\approx 0,008$.

Observou-se, ainda, uma tendência sugestiva de correlação positiva entre os dados de densidade e índice de refração (n_o). Essa correlação positiva estaria relacionada ao acréscimo observado nos teores de álcalis, que também indicam a existência de um zoneamento geoquímico interno no corpo e são responsáveis pela variação desses parâmetros em amostras de um mesmo pegmatito.

A partir dos dados de FTIR e de DRX, de acordo com Aurisichio *et al.* (1994), foi feita uma correlação das bandas situadas próximo a 1.200 cm^{-1} , referentes à ligação Si-O-Si, e a 810 cm^{-1} , referentes à Be-O, com as razões c_0/a_0 , o que permitiu caracterizar os polítipos (O, O-N, N, N-T e T) das amostras de berilo. Observou-se que dos 12 cristais amostrados, 6 de coloração azul – esverdeada representam berilos tipo N-T (de transição); 5 cristais de coloração azul e 1 cristal zonado (róseo/incolor) representam berilos tipo T (tetraédricos), com substituições do Be por Li e/ou, mais raramente, por Si, no sítio tetraédrico (Fig. 2a e 2b). Os dados de FTIR permitiram, ainda, constatar a presença de H_2O do tipo I > H_2O do tipo II > CO_2 , como os principais constituintes fluidos.

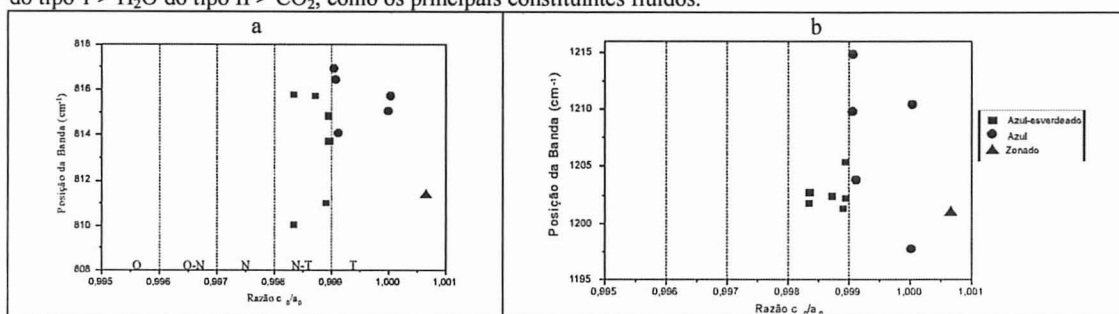


Figura 2: (a) Caracterização dos polítipos de berilo, segundo a banda referente à ligação Be-O; (b) Caracterização dos polítipos de berilo, segundo a banda referente à ligação Si-O (adaptado de Aurisichio *et al.*, 1994).

Por meio das análises químicas verificou-se que este corpo pegmatito é o que apresenta os menores valores para o elemento cério e também para o somatório dos elementos alcalinos raros, em relação a todos os outros do Distrito de Santa Maria de Itabira; entretanto, apresenta valores elevados de lítio, quando comparado com os demais. O teor em ferro na forma elementar variou entre 0,413 a 0,483, sendo este o principal cromóforo (Marciano, 1995).

MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO DAS INCLUSÕES FLUIDAS

Conforme discutido por Newman Carvalho *et al.* (2005), em geral, as inclusões fluidas presentes nas amostras de berilo possuem morfologias irregulares, predominantes sobre as regulares (cristais negativos), ambas apresentando formas achatadas e alongadas. De um modo geral, as inclusões fluidas primárias, distribuem-se segundo orientações paralelas e perpendiculares em relação ao eixo e do mineral hospedeiro, podendo também ocorrer de modo aleatório. Observa-se também a presença de inclusões distribuídas em fraturas cicatrizadas, sugerindo origem pseudo-secundária e/ou secundária. As inclusões primárias ocorrem mais raramente, sendo, no entanto, predominantes em alguns cristais. Feições de escape e estrangulamento e a presença de efeito “chuva” são freqüentes nos cristais de água-marinha. As inclusões fluidas podem conter fases sólidas representadas por cristais anisótropos de coloração castanho-avermelhada, verde, amarelada e azulada, sendo, provavelmente, palhetas de mica, provenientes dos micaxistos da Formação São Tomé. Muitas vezes, essas fases sólidas são constituídas por minerais euédricos de alta birrefringência, provavelmente do grupo dos carbonatos.

À temperatura ambiente, predominam, nos cristais de berilo (variedade água-marinha, morganita e goshenita), inclusões fluidas trifásicas [$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ - $\text{CO}_{2(l)}$ - $\text{CO}_{2(v)}$] distribuídas ao longo de planos de cicatrização de fraturas internas e transgranulares, indicando, respectivamente, origens pseudo-secundária e secundária. São também observadas inclusões bifásicas aquocarbônicas (l-v), com CO_2 já homogeneizado; estas quando possuem uma fase sólida se tornam trifásicas (l-v-s₁) e quando possuem mais de uma fase sólida, tornam-se multifásicas (l-v-s₁-s₂). É comum, ainda, a presença de inclusões monofásicas, bem como aquelas bifásicas com fase gasosa de coloração cinza escura. As proporções volumétricas entre as fases líquida e vapor variam de 10 a 90%, nas inclusões bifásicas.

ANÁLISES MICROTERMOMÉTRICAS E CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS MINERALIZANTES

Para cada grupo de inclusões fluidas foram registradas as temperaturas de fusão e homogeneização das fases presentes e determinadas as composições químicas das soluções aquosas, por meio das temperaturas do eutético (Te). A salinidade, expressa em equivalente da porcentagem em peso de NaCl, resultou das medidas da temperatura de fusão do clatrato (Tcl). Os valores de Te e Tcl, ao lado dos referentes às temperaturas de homogeneização do CO_2 (Th_{CO2}) permitiram identificar quatro grupos distintos de inclusões fluidas, independentemente de suas características (morfologia, orientação, etc.), conforme listado na Fig. 3.

Classificação	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Origem	primárias	pseudo-secundárias	pseudo-secundárias	secundárias
Forma	cristal negativo, tubular, regular	tubular, regular	irregular, amebóide	irregular, amebóide
Dimensão	10 a 30 μm	20 a 40 μm	20 a 40 μm	20 a 50 μm
Fases (25°C)	trifásicas e bifásicas	Trifásicas	trifásicas	bifásicas
Distribuição	Aleatórias e // ao eixo c	alinhadas direções não definidas	alinhadas direções não definidas	fraturas irregulares
Te	-36 a -29°C	-46 a -41°C	-74 a -65°C	-83 a -78°C
Tf _{CO₂}	-56,6°C	-56,7°C	-56,7°C	-56,8°C
Tcl	6°C	7°C	8°C	10°C
Th _{CO₂}	31,1°C	25,1°C	22,1°C	17,1°C
Thtot	310 a 470°C	300 a 410°C	320 a 400°C	200 a 250°C
Salinidade	6% peso NaCl eq.	8,12% peso NaCl eq.	6,24% peso NaCl eq.	10,31% peso NaCl eq.

Figura 3 – Dados microtermométricos das amostras de berilo do Pegmatito Lavra da Generosa

Os valores de Te das inclusões primárias, pertencentes ao grupo 1, parecem sugerir a presença de sistemas aquosos com Na⁺, K⁺, podendo conter Fe²⁺ e Fe³⁺. Nas inclusões pseudo-secundárias do grupo 2, os registros de Te sugerem um provável sistema aquoso enriquecido em Na⁺, K⁺ e Ca²⁺, podendo conter Fe²⁺, Fe³⁺ e Al³⁺. Desse modo, as Te das inclusões dos grupos 1 e 2 sugerem uma evolução na direção do enriquecimento em cálcio. As Te das inclusões pseudo-secundárias do grupo 3 são sugestivas de soluções aquosas enriquecidas em Al³⁺, Zn²⁺ e Li⁺. As inclusões secundárias pertencentes ao grupo 4, de modo geral, apresentaram valores de Te mais expressivos nas temperaturas -83,0, -80,0 e -78,0 °C, que evidenciam o enriquecimento do sistema em Li⁺, resultando em um fluido mais evoluído e mais enriquecido em álcalis.

A análise dos espectros de FTIR mostram a predominância da H₂O tipo I (bandas 3.690, 3.590 e 1.630 cm⁻¹) sobre a de tipo II (bandas 3.660 e 1.540 cm⁻¹), ocorrendo, ainda, dentre os componentes fluidos, o CO₂, (2.354 e 2.329 cm⁻¹) e, mais raramente, o CH₄ (2.796 cm⁻¹).

CONCLUSÕES

Os resultados dos estudos realizados, aliados aos dados químicos e mineralógicos, permitem inferir tratar-se de um corpo pegmatítico pouco diferenciado. Quanto à sua gênese, é considerado como sendo um pegmatito de origem anatótica, devido ao fato de estar classificado como pegmatito radioativo, além da presença dos minerais samarskita e euxenita.

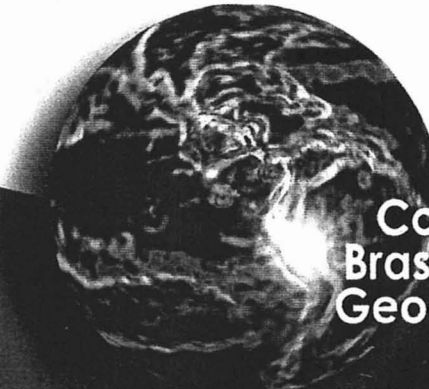
O acréscimo da razão c₀/a₀ sugere uma evolução politípica que vai do berilo de transição, N-T, até o berilo tetraédrico, tipo T, ainda mais rico em álcalis (Fig.2). Esses dados estão coerentes com a procedência dos cristais de berilo de regiões preferencialmente enriquecidas em álcalis, ou seja: zona intermediária e corpos de substituição.

Os dados de Te e de Thtot das inclusões fluidas dos berilos provenientes desse corpo parecem sugerir uma evolução a partir de um sistema aquoso de baixa salinidade, contendo Na⁺, K⁺, com possíveis quantidades de Fe²⁺ e Fe³⁺, para soluções com Ca²⁺, Al³⁺ ± Mg²⁺, passando para um sistema enriquecido em Zn²⁺, Al³⁺ e Li⁺. Assim, nota-se, de modo geral, um enriquecimento gradativo tanto em cálcio como em álcalis (lítio), talvez decorrente de variações locais nas composições dos fluidos, que poderiam ter sido responsáveis pelo zoneamento geoquímico interno do mesmo.

Os espectros de FTIR evidenciam a alta presença de CO₂, corroborando aos dados de Newman Carvalho *et al.* (2005) que descreveram a abundância de inclusões fluidas trifásicas compostas por dois líquidos imiscíveis [H₂O_(l)-CO_{2(l)}-CO_{2(v)}].

BIBLIOGRAFIA

- Aurischio, C.; Grubessi, O.; Zecchini, P. 1994. Infrared spectroscopy and crystal chemistry of the beryl group. *Canadian Mineralogist*, **32**(1): 55-68.
- Fernandes, M.L.S. 2001. O Granito Borrachudos entre Guanhões e Dolores de Guanhões, MG (Plutonito Morro do Urubu): Gênese e Evolução. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ined. 187 p.
- Grossi SAD, J.H. 1997. Projeto Espinhaço; geologia da Folha Guanhões, Minas Gerais. Escala 1:100.000. Belo Horizonte, SEME/COMIG/UFMG. 117 p.
- Machado N., Schrank A., Noce C.M., Gauthier G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **141**: 259-276.
- Marciano, V.R.P.R.O. 1995. *O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais: mineralogia, geoquímica e zonedificação*. São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 216p.
- Newman Carvalho D.T. de, Gandini A.L., Bello R.M.S., Fernandes M.L.S. 2005. Caracterização Morfológica das Inclusões Fluidas no Berilo do Pegmatito Lavra da Generosa, Campo Pegmatítico de Sabinópolis, Minas Gerais. In: 9º Simpósio de Geologia do Sudeste / 13º Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Niterói, SBG – MG, *Anais*, abstract 099.



XI
Congresso
Brasileiro de
Geoquímica

ANO INTERNACIONAL DO PLANETA TERRA

Geoquímica no Ano Internacional
do Planeta Terra

26223

CD
551.9081
C749
11.a

ANNAIS

2007