

## CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FLUIDOS RESPONSÁVEIS PELA FORMAÇÃO DO BERILO NOS PEGMATITOS IPÊ, FERREIRINHA, JONAS LIMA E ESCONDIDO, GOVERNADOR VALADARES, MG

Carvalho Newman D.T.de<sup>1</sup>, Bello R.M.S.<sup>2</sup>, Gandini A.L.<sup>1</sup>, Fernandes M.L.S.<sup>3</sup>, Marciano V.R.P.R.O.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Geologia, daniela@degeo.ufop.br, gandini@degeo.ufop.br

<sup>2</sup>. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, rosabell@usp.br

<sup>3</sup>. Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pesquisa Professor Manoela Teixeira da Costa, lourdes@geolige.ufmg.br,

<sup>4</sup>. Museu de Mineralogia Professor Djalma Guimaraes, museumin@pbh.gov.br

Palavras-chave: berilo, pegmatitos, inclusões fluidas, microtermometria

### INTRODUÇÃO

Nesse trabalho são apresentadas os dados microtermométricos e as características físico-químicas dos fluidos mineralizantes, referentes ao estudo das inclusões fluidas (10 a 50 µm, comprimento no maior eixo), presentes em 100 regiões referentes a 81 lâminas, oriundas de 23 cristais de berilo, nas variedades águamarinha, morganita e goshenita, pertencentes a quatro corpos pegmatíticos (Ipê, Ferreirinha, Jonas Lima e Escondido) situados à nordeste da cidade de Governador Valadares, MG, porção leste da Folha de Marilac (SE-23-Z-B-VI), dando continuidade aos estudos em desenvolvimento na região (Gandini, 1999; Bello *et al.*, 2000, De Carvalho 2004, entre outros).

Os pegmatitos estudados pertencem ao Campo Pegmatítico de Marilac, Distrito Pegmatítico de Governador Valadares, Província Pegmatítica Oriental do Brasil. Localizam-se na porção oriental da Faixa Araçuá, nas proximidades da borda leste do Cráton do São Francisco, e encontram-se encaixados nos micaxistas da Formação São Tomé do Grupo Rio Doce, atribuído ao Proterozóico Médio a Superior (Pinto *et al.* 2002). Constituem corpos tabulares concordantes com as encaixantes, possuem idades  $Rb/Sr \approx 497 \pm 13$  Ma, relativas ao Ciclo Brasiliano (Marciano, 1985). A estruturação desses corpos varia do tipo zonado simples (Ipê/Ferreirinha) ao complexo (Jonas Lima/Esccondido). São constituídos essencialmente por feldspato, por vezes, pertítico, quartzo (hialino, fumé, róseo e leitoso), muscovita, albita, às vezes, cleavelandita. Os acessórios mais comuns são: biotita, granada, ferrocolumbita-tantalita, turmalina (preta, verde e, mais raramente, azulada) e berilo (industrial, água-marinha, morganita e goshenita) (Marciano 1985, Correia Neves *et al.* 1986; Gandini, 1999, De Carvalho 2004).

### MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos petrográficos das inclusões foram desenvolvidos em um microscópio petrográfico binocular da 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 Chaix-Meca, (Poty *et al.* 1976), acopladas aos microscópios petrográficos descritos acima. Foram inicialmente observadas 100 regiões de 81 fragmentos de cristais, totalizando o estudo de, aproximadamente, 820 inclusões, de forma a definir suas características nas variedades de berilo dos quatro corpos pegmatíticos. Os estudos foram realizados nos laboratórios de Inclusões Fluidas do DEGEO/EM/UFOP, do IGc/USP e do CDTN.

### MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO DAS INCLUSÕES FLUIDAS

Conforme discutido em De Carvalho (2004), os cristais de berilo contêm um número relativamente elevado de inclusões fluidas que ocorrem tanto reunidas em pequenos grupos, como isoladas em determinadas regiões do cristal. De modo geral, possuem morfologias regulares, representadas por cristais negativos hexagonais, predominantes sobre as irregulares. Distribuem-se segundo orientações paralelas, perpendiculares ou inclinadas em relação ao eixo e do mineral hospedeiro, com feições indicativas, na maioria dos casos, de origem primária, embora tenham sido também observadas em planos de cicatrização de fraturas internas, constituindo inclusões pseudo-secundárias. Em alguns casos, encontram-se dispostas em fraturas muito bem delineadas, sugerindo uma origem posterior com relação às pseudo-secundárias. Deve ainda ser ressaltado, que algumas inclusões irregulares apresentam feições indicativas de escape de fluidos (*leakage*) ou estrangulamento (*neckingdown*), sugerindo modificações posteriores ao seu aprisionamento, não tendo sido consideradas nos estudos microtermométricos.

No que se refere ao número de fases à temperatura ambiente (25°C), excetuando-se os cristais de morganita e goshenita, as inclusões fluidas apresentaram-se essencialmente bifásicas com predominância da fase líquida. Em casos particulares observou-se a presença de inclusões trifásicas e multifásicas com aprisionamento de 1 ou mais fases sólidas. No caso das amostras de morganita e goshenita, predominam inclusões fluidas trifásicas compostas por dois líquidos imiscíveis, além de uma fase gasosa.

Os sólidos presentes nas inclusões fluidas são, em sua maioria, anisótropos, possuindo coloração castanho-avermelhada ou verde. Opticamente parece tatar-se de palhetas de mica provenientes da encaixante constituída pelos micaxistas da Formação São Tomé, aprisionadas ocasionalmente.

### 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 às 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) ou da temperatura



de fusão do gelo (Tge). Os valores de Te, Tge e Tcl, ao lado dos referentes às temperaturas de homogeneização do CO<sub>2</sub> (Th<sub>CO<sub>2</sub></sub>) permitiram identificar dois grupos distintos de inclusões fluidas, independentemente de suas características (morfologia, orientação, etc.) (Tabela 1 e 2).

Os valores de Te das inclusões dos cristais de berilo provenientes do Pegmatito Ipê, parecem sugerir uma

evolução partindo de sistemas aquosos com Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, podendo conter Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup>, para soluções mais enriquecidas, principalmente em Ca<sup>2+</sup>. Deve-se ressaltar que enquanto nas inclusões primárias ocorre, muitas vezes, um espalhamento grande em seus valores de Te, as pseudo-secundárias, representativas de fluidos mais evoluídos, apresentaram picos por volta de -49°C e -39°C, evidenciando o aporte de Ca<sup>2+</sup> no sistema.

**Tabela 1 - Dados microtermométricos das inclusões fluidas dos berilos dos Pegmatitos Ipê e Ferreirainha.**

Pegmatito	Amostra	Grupo	Te (°C)	Tge (°C)	Tcl (°C)	Th <sub>tot</sub> (°C)	Salinidade (% peso NaCl)
Ipê	água-marinha	1	-29,0 a -27,0	-2,0	7,0	180	0,80
		2	-50,0 a -49,0	-6,0	4,0	220	5,10
	água-marinha		-45,0 a -39,0	-3,0	2,0	200	2,40
	água-marinha		-46,0 a -32,0	-3,0	3,0	220	0,90
Ferreirinha	água-marinha		-29,0 c -34,0	-5,0	3,0	200	5,20
	água-marinha		-28,0	-2,0	2,0	240	0,80
	água-marinha	1	-29,0	-3,0	6,0	210	6,64
		2	-37,0	-6,0	2,0	240	2,38
	água-marinha	1	-31,0	-1,0	9,0	200	0,90
		2	-55,0	-3,0	3,0	210	2,40
	água-marinha		-40,0	-2,0	3,0	320	0,90
	água-marinha		-42,0	-4,0	6,0	250	3,80
	água-marinha		-46,0	-3,0	6,0	250	0,90

**Tabela 2 - Dados microtermométricos das inclusões fluidas dos berilos dos Pegmatitos Jonas Lima e Escondido.**

Pegmatito	Amostra	Grupo	Te (°C)	Tge (°C)	TF <sub>CO<sub>2</sub></sub> (°C)	Tcl (°C)	Th <sub>CO<sub>2</sub></sub> (°C)	Th <sub>tot</sub> (°C)	Salinidade (% peso NaCl)
Jonas Lima	água-marinha		-72,0	-2,0	-56,6	5,0	25,0	200	9,75
	água-marinha		-49,0	-2,0		4,0	210	6,24	
	morganita		-73,0 c -67,0	-2,0		8,0	310	6,24	
		1	-53,0	-2,0		8,0	200	0,80	
Escondido	água-marinha	2	-68,0	-9,0		2,0	240	10,30	
			-54,0 c -62,0 c -72,0	-2,0		9,0	240	0,78	
	goshenita								
	goshenita c morganita		-75,0 c -71,0	-7,0	-56,6	2,0	24,5	280	12,24
		1	-60,0	-2,0		7,0	160	1,20	
	água-marinha	2	-65,0	-10,0	-56,6	7,0	25,0	250	10,60

Nos cristais do Pegmatito Ferreirainha I e II, os registros de Te das inclusões sugerem um provável sistema aquoso enriquecido em Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup>, podendo conter Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> e Zn<sup>+</sup>. Nas inclusões pseudo-secundárias os picos de Te são mais representativos principalmente da presença de Zn<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup> e Ca<sup>2+</sup> no sistema.

As inclusões nos cristais provenientes do Pegmatito Jonas Lima II apresentaram registros de Te sugestivos de soluções aquosas com Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Zn<sup>+</sup>, e Li<sup>+</sup>. Os valores de Te para as inclusões pseudo-secundárias dos cristais de morganita apresentaram picos mais expressivos por volta de -74,0°C, evidenciando ainda mais a presença de Li<sup>+</sup> do sistema.

Nos berilos do Pegmatito Escondido, as inclusões apresentaram, de modo geral, picos de Te mais expressivos nas temperaturas -53,0, -65,0, -68,0, -71,0 e -78,0°C, que sugerem tratar-se de uma solução aquosa enriquecida em Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Zn<sup>+</sup> e Li<sup>+</sup>. Os valores de Te das inclusões secundárias evidenciam o enriquecimento do sistema em Li<sup>+</sup>, resultando em um fluido mais evoluído e mais enriquecido em álcalis.

Os menores valores de Te obtidos, juntamente com as marcantes diferenças observadas, ao invés de representarem os sistemas mencionados, poderiam, também, ser decorrentes de metaestabilidade, consequência do aumento da pressão interna das inclusões fluidas com o resfriamento, conforme proposto por Davis *et al.* (1990). No entanto, com a exceção dos cristais de morganita, não foi observado o desaparecimento da fase vapor com o resfriamento, o que poderia ter causado um aumento da pressão interna, e, portanto, a presença de metaestabilidade. Desse modo, parece ser mais provável que os valores de Te representem, realmente soluções de composições distintas.

O CO<sub>2</sub> somente ocorre em maiores quantidades no caso de Jonas Lima e Escondido (Tabela 2), onde suas temperaturas de fusão mostram que esse componente é bastante puro e suas temperaturas de homogeneização são indicativas de densidades médias ao redor de 0,7 g/cm<sup>3</sup>. Nas inclusões dos cristais do Pegmatito Ipê o CO<sub>2</sub> apenas pode ser detectado por análises de micro-Raman (Bello *et*



al. 2000) ocorrendo em quantidades variáveis dependendo do posicionamento da amostra no corpo.

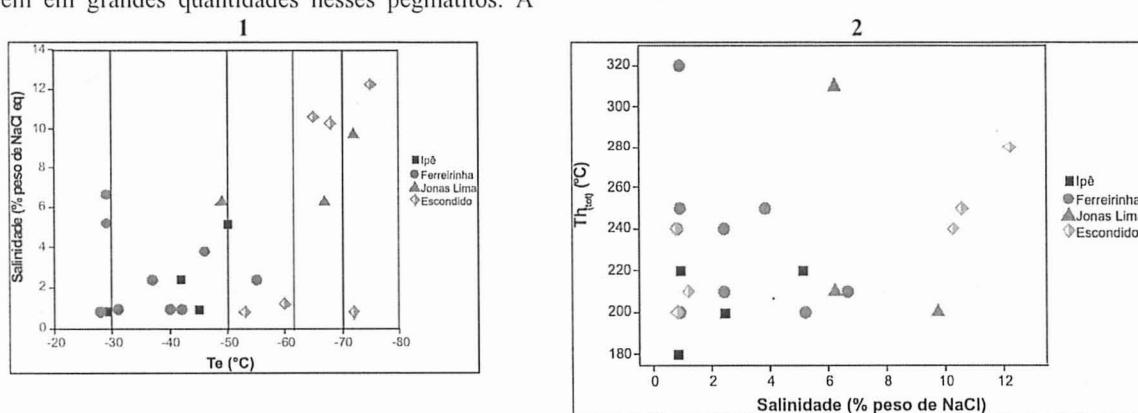
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados microtermométricos permitiram a determinação das densidades dos fluidos envolvidos na cristalização do berilo e a construção das respectivas isócoras num diagrama P-T por meio do programa ISOC (Bakker 2003). Considerando-se nesses diagramas as temperaturas mínimas de aprisionamento, representadas pelas maiores freqüências das  $\text{Th}_{\text{tot}}$ , foram obtidas as pressões mínimas de formação dos cristais de berilo em cada caso, a saber: 270bar (Ipê); 1.000bar (Ferreirinha); 1.290bar (Jonas Lima) e 1.500bar (Escondido).

De forma geral, a presença dos elementos descritos anteriormente pode ser justificada a partir das paragêneses minerais observadas nos pegmatitos e dos estudos químicos realizados por Gandini (1999) para os diversos minerais desses corpos. Em todos os pegmatitos estudados, alguns valores de Te são sugestivos de sistemas com magnésio. No entanto, as análises químicas de minerais (Gandini 1999) e aquelas efetuadas nas amostras de berilo aqui estudadas mostraram que esse elemento ocorre em quantidades muito pequenas, não devendo ter participação significativa nos fluidos. Desse modo, em detrimento do magnésio, foi considerada principalmente a presença do  $\text{Ca}^{2+}$  na solução, o que pode ser justificado pela existência de minerais ricos nesse elemento, como por exemplo a apatita, bem como pela composição química dos feldspatos associados ao berilo, determinada por Gandini (1999). Roedder (1984) discute que sistemas cujo eutético é  $< -40^\circ\text{C}$ , já podem significar enriquecimento em cálcio. Esses fatos sugerem que, na época do aprisionamento das inclusões e cristalização do berilo, os fluidos deveriam estar enriquecidos nesse elemento. O ferro também deve ter sido um elemento importante nas soluções por tratar-se de um cromóforo da água-marinha e, ainda, por estar presente nas biotitas que ocorrem em grandes quantidades nesses pegmatitos. A

existência do zinco nas soluções, sugerida pelas Te no caso dos pegmatitos Ferreira, Jonas Lima e Escondido, também não pode ser descartada, uma vez que esse elemento foi detectado, em algumas quantidades, nas análises químicas das micas (Gandini 1999). No caso do lítio, sua presença é mais significativa nos pegmatitos Jonas Lima e Escondido, onde ocorrem as micas litiníferas conforme descrito por Gandini (1999). Por meio da análise das Figuras 1 e 2, verifica-se uma tendência evolutiva do fluido mineralizante formador dos quatro corpos pegmatíticos: Ipê, Ferreira, Jonas Lima e Escondido. Nota-se que há uma variação dos componentes do sistema aquoso tanto dentro dos próprios corpos quanto entre as 4 lavras. Assim, as Te das inclusões fluidas dos berilos provenientes desses corpos parecem sugerir uma evolução a partir de um sistema aquoso de baixa salinidade, contendo  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , com possíveis quantidades de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , caso do Ipê, para soluções com  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+} \pm \text{Mg}^{2+}$ , caso do Ferreira, passando por um sistema enriquecido em  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Li}^+$ , caso do Jonas Lima, e culminando no escondido que apresenta um sistema aquoso, de salinidade média, com  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+} \pm \text{Mg}^{2+}$ , podendo conter bromo e ferro. Assim, nota-se, de modo geral, um enriquecimento gradativo tanto em cálcio como em álcalis (lítio) em direção aos pegmatitos mais evoluídos, embora, em amostras de um mesmo corpo também tenham sido constatadas algumas evoluções, talvez decorrentes de variações locais nas composições dos fluidos, que poderiam ter sido responsáveis pelo zoneamento geoquímico interno dos mesmos.

O diagrama  $\text{Th}_{\text{tot}}$  em função da salinidade mostra a ampla variação nos valores dos dois parâmetros para amostras pertencentes a um mesmo pegmatito, sugerindo mais uma vez a ação de fluidos posteriores, em cada corpo, que podem ter reequilibrado e modificado as inclusões originalmente aprisionadas.



Figuras 1 e 2– Diagramas mostrando a variação da Te e  $\text{Th}_{\text{tot}}$  com a salinidade para os quatro corpos pegmatíticos. Linhas verticais: (-30°C) sistemas com  $\text{Na}^+$ ; (-50°C) sistemas com  $\text{Ca}^{2+}$ ; (-60°C) sistemas com  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ; (-70°C) sistemas com  $\text{Li}^+$



## CONCLUSÕES

O resultado das análises microtermométricas das inclusões fluidas permitiram tecer algumas considerações acerca da evolução geoquímica e de alguns aspectos genéticos dos pegmatitos Ipê, Ferreirinha I e II, Jonas Lima I e II e Escondido, pertencentes ao Campo Pegmatítico de Marilac. Os estudos cristaloquímicos realizados por De Carvalho (2004) aliados à microtermometria das inclusões fluidas permitiram inferir que esses corpos pegmatíticos são pouco diferenciados, concordando com os resultados obtidos por Gandini (1999) (sobre os) nos pegmatitos do Campo de Marilac.

Por meio das temperaturas do eutético, pode-se verificar uma tendência evolutiva do fluido mineralizante tanto entre os quatro pegmatitos (Ipê, Ferreirinha, Jonas Lima e Escondido) como no interior de cada corpo. Essas temperaturas sugerem uma evolução a partir de um sistema aquoso de baixa salinidade, contendo  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , com possíveis quantidades de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , caso do Ipê, para soluções enriquecidas em  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , caso do Ferreirinha, passando para um sistema onde também podem estar presentes  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Li}^+$ , no pegmatito de Jonas Lima e, finalmente, para soluções aquosas de salinidades médias, com  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Zn}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e, possivelmente, boro e ferro, no Escondido. Tais dados representam uma evolução geoquímica que vai dos pegmatitos menos diferenciados (Ipê/Ferreirinha) em direção aos de maior grau de diferenciação, contendo maiores teores de  $\text{CO}_2$  e álcalis (Jonas Lima/Escondido).

## AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos aos laboratórios de microtermometria do DEGEO/EM/UFOP, do IGc/USP e do CDTN e ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto, pela colaboração prestada na execução das análises e obtenção dos resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bello, R.M. da S.; Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Fuzikawa, K.; Carvalho, F.M.S.; Svisero, D.P.; Souza, L.A.C.; Dantas, M.S.S.; 2000. Caracterização mineralógica e composição química das inclusões fluidas de berilo do Pegmatito Ipê, município de Governador Valadares, Minas Gerais. *Geonomos*, 8(2): 45-54.
- Bakker, R.J. 2003. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 194: 2-23.
- Correia Neves, J.M.; Pedrosa-Soares, A.C.; Marciano, V.R.P.R.O. 1986. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1): 106-118.
- Davis, D.W., Lowenstein, T.K., Spencer, R.J. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaCl}-\text{MgCl}_2-\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{NaCl}-\text{CaCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 591-601.
- De Carvalho, D.T. 2004. Estudos Mineralógicos e Microtermométricos dos berilos dos Pegmatitos Ipê,

- Ferreirinha, Jonas Lima e Escondido, Governador Valadares, MG. *Contribuições às Ciências da Terra*, 09: 151p, (Série M).p.
- Gandini, A.L. 1999. Aspectos da Mineralogia, Geoquímica, Gênese e Potencialidade Econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais. São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 261p.
- Marciano, V.R.P.R.O. 1985. Contribuição ao estudo da mineralogia e geoquímica de pegmatitos da região de Governador Valadares, Minas Gerais. São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 213p.
- Roedder, E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12: 1-644.