

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS INCLUSÕES FLUIDAS DE BERILO DO PEGMATITO IPÊ, MUNICÍPIO DE GOVERNADOR VALADARES, MINAS GERAIS

R.M. da S. Bello¹, A.L. Gandini², V.R.P.R.O. Marciano³, K. Fuzikawa⁴, F.M.S. Carvalho¹, D.P. Svisero¹, L.A.C. Souza⁵, M.S.S. Dantas⁶

ABSTRACT

The Ipê pegmatite is situated to the northwest of Minas Gerais State, Brazil, and belongs to the Marilac Pegmatitic Field of the Província Pegmatítica Oriental do Brasil. The essential minerals found are: K-feldspar, quartz, muscovite and biotite. The accessory minerals are: kaolin, albite, apatite, beryl, niobium-tantalite, garnet and tourmaline. The beryl crystals always contain abundant primary and pseudosecondary fluid inclusions composed essentially by aqueous solutions of low salinity. Eutectic temperature data and micro-Raman and infrared Spectroscopy analyses of the inclusions of the samples from the graphic and intermediate zones, and from the substitution body suggest that the fluids have evolved from systems which were originally enriched in Na⁺, K⁺, and possibly Fe²⁺ and Fe³⁺ (\pm CO₂ \pm CH₄ \pm N₂) to Ca-richer solutions, with more abundant CO₂. The fluid homogenization temperatures corroborate this evolution hypothesis and additionally suggest that the inclusions from the graphic and intermediate zones were reequilibrated by later solutions.

INTRODUÇÃO

O Pegmatito do Ipê pertence à Província Pegmatítica Oriental (Paiva 1946), encontrando-se localizado no Distrito Pegmatítico de Governador Valadares no Campo de Pegmatítico de Marilac (Correia Neves *et al.* 1986), distando 37km a NW da cidade de Governador Valadares. Encontra-se a leste da Serra do Espinhaço, no Vale do Rio Doce, na parte oriental da Faixa Araçuaí (Almeida *et al.* 1976) nas proximidades da borda leste do Cráton do São Francisco (Almeida 1977), inserido na folha de Marilac (Ribeiro 1997) (Figura 1). O grau metamórfico dessa faixa cresce, geralmente, desde o fácies xisto verde na borda do Cráton até o fácies anfíbolito nas suas porções mais internas (Pedrosa Soares *et al.* 1994). O corpo pegmatítico está encaixado concordantemente em quartzo-biotita xisto da denominada Formação São Tomé (Barbosa *et al.* 1964) a qual foi integrada ao Grupo Rio Doce por Barbosa *et al.* (1966).

Inúmeros trabalhos tratam da mineralogia e de aspectos geoquímicos e genéticos de vários pegmatitos do Campo de Marilac, destacando-se os de Barbosa (1944), Pecora *et al.* (1950 a,b), Wegner (1983), Correia

Neves *et al.* (1984), Proctor (1985), Marciano (1985), Santos (1985), Correia Neves *et al.* (1986), Delaney (1996), Achtschin e Marciano (1996), Ribeiro (1997), Banko (1997) e Gandini (1999).

No caso específico do Pegmatito Ipê destaca-se o trabalho de Achtschin *et al.* (1996) que realizaram o mapeamento de detalhe desse corpo, apresentando, ainda, resultados de estudos mineralógicos e geoquímicos. Esse pegmatito tem sido lavrado desde 1940, quando produziu grande quantidade de mica, como mineral estratégico para a II Guerra Mundial (Pecora *et al.* 1950a,b).

No presente trabalho, são apresentados resultados de estudos microtermométricos de inclusões fluidas em cristais de berilo do Pegmatito Ipê, realizados no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, por meio de uma platina de marca Chaixmeca, modelo MTM-85. Essas análises, ao lado de dados de espectroscopia de absorção no infravermelho e micro-Raman, obtidos na Universidade Federal de Minas Gerais, permitiram estabelecer as composições aproximadas dos fluidos envolvidos, bem como os aspectos de sua evolução, durante a cristalização desse mineral nas zonas consideradas.

¹IGc, Universidade de São Paulo, Pesquisadora Dr^a, rosabello@uol.com.br
Pesquisador M.Sc., flavioms@usp.br
Prof. Titular, pg01_igc@recad.usp.br

²DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Prof. Dr., gandini@degeo.ufop.br

³CPMTC, Universidade Federal de Minas Gerais, Pesquisadora Dr^a, israel@gold.com.br

⁴CDTN, Comissão Nacional de Energia Nuclear-BH, Geólogo Ph.D., kazuo@urano.cdtm.br

⁵CECOR/EBA, Universidade Federal de Minas Gerais, Prof. Dr., conserv@dedalus.lcc.ufmg.br

⁶DF/ICEX/, Universidade Federal de Minas Gerais, Prof^a Dr^a, dantas@df.ufmg.br

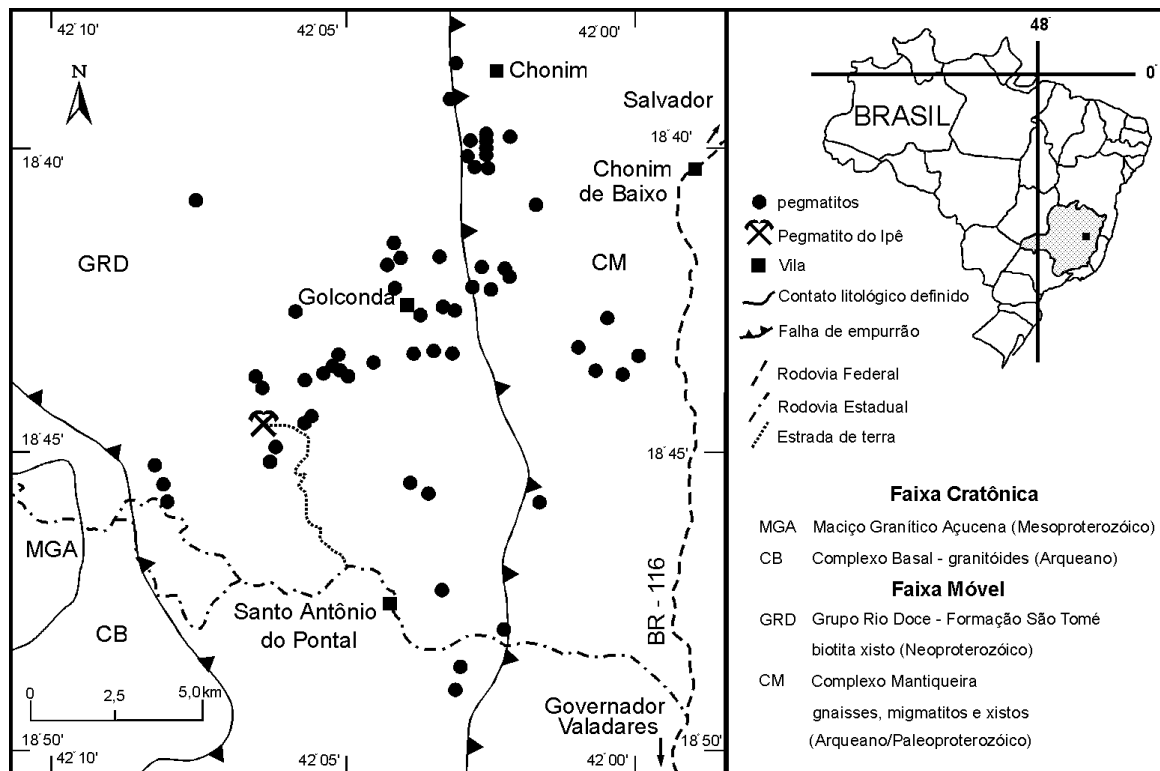


Figura 1: Mapa geológico mostrando a área do Pegmatito do Ipê, além de um conjunto de pegmatitos pertencentes ao Campo de Marilac (Modificado de Ribeiro 1997).

Figure 1: Geologic map of the Marilac Quadrangle. In detail, the Ipê Pegmatite (Modified after Ribeiro 1997).

MINERALOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO PEGMATITO

O corpo pegmatítico do Ipê destaca-se na área por ser de grande porte, apresentando uma altura, na parte aflorante, da ordem de 25m, com comprimento que excede a 200m. Trata-se de um corpo de morfologia tabular, totalmente aberto, com amplos salões, permitindo desta forma o fácil acesso e uma boa iluminação interior.

A mineralogia principal do Pegmatito Ipê é constituída por feldspato potássico, quartzo, muscovita e biotita, enquanto a mineralogia acessória é representada por caulim, albita, apatita, berilo, tântalo-columbita (Nb,Ta), granadas e turmalinas (Gandini *et al.* 2000).

As cinco aberturas que dão acesso ao salão principal, permitem visualizar a estrutura zonada, com a presença da zona marginal com poucos centímetros de espessura, zona mural, a maior delas atualmente, pois a zona intermediária foi explotada para uso industrial do feldspato de primeira qualidade, do feldspato de textura gráfica e do quartzo para indústria vidreira e cerâmica. Gigantescos cristais anédricos de quartzo róseo e leitoso, de cerca de 10m, são vistos, nas colunas que separam as galerias, segundo orientações paralelas entre si, podendo corresponder a núcleos ou a resquícios de zona intermédia. Finalmente, ocorrem poucas unidades de substituição constituídas por cavidades com cristais euédricos de quartzo, fumê e incolor, 'livros' de muscovita que apresentam zonamento intenso, berilo, apatita, entre outros. Fato que ressalta à vista, são as ripas de biotita de

até 2m de comprimento, na zona mural, dispostas com o eixo *c* paralelo ao contato do pegmatito com a encaixante, sendo, no entanto, a seção do cristal, aproximadamente perpendicular a esse contato.

CRISTALOQUÍMICA DO BERILO

Foram estudados, em detalhe, cinco amostras de berilo de cor azul a verde azulado, coletados segundo à estrutura do corpo do Pegmatito Ipê (Gandini 1999), pertencentes às zonas gráfica (amostra 5540) e intermediária (amostra 5542), a um corpo de substituição (amostras 5529 e 5541) e uma amostra coletada no rejeito (am. 5575). A partir da razão c/a_0 , obtida por meio das análises de difração de raios X, obtidos por um difratômetro SIEMENS D-5000 pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, as cinco amostras de berilo foram classificadas, segundo Bakakin *et al.* (1970) e Aurisicchio *et al.* (1994) em: **N** - tipo normal, **T** - tipo tetraédrico e uma amostra de transição entre o tipo normal e o tetraédrico. O tipo **N** de berilo é aquele que se aproxima mais da fórmula teórica, não apresentando substituição catiônica. No tipo **T** ocorre substituição parcial do berílio por lítio e, às vezes, por silício, o que acarreta a entrada de elementos alcalinos no canal. Esta pequena variação composicional corrobora com a constância dos valores obtidos para o peso específico e para os índices de refração (Tabela 1).

amostra	zona	cor	d	n _E	n _O	Δ	a _o	c _o	c _o /a _o	polítipo
5575	coletado no rejeito	verde azulado	2,73	1,578	1,585	0,007	9,2274	9,2073	0,9978	N
5541a	c. subst.	azul claro	2,74	-	-	-	9,2206	9,2044	0,9982	N-T
5542	z. int.	azul claro	2,73	1,578	1,585	0,007	9,2183	9,2115	0,9993	T
5540b	z. gráf.	azul claro	2,74	1,580	1,585	0,005	9,2116	9,2080	0,9996	T
5529	c. subst.	azul claro	2,74	-	-	-	9,2120	9,2066	0,9994	T

Tabela 1: Propriedades físicas dos cristais de berilo do Pegmatito Ipê (Gandini 1999).

Table 1: Physical properties of beryl crystals of the Ipê Pegmatite (Gandini 1999).

Composições químicas obtida por fluorescência de raios X, espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado e titulometria de oito amostras de berilo do Pegmatito Ipê (Gandini 1999), realizadas no Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa da Universidade Federal de Minas Gerais, foram utilizadas para caracterizar os berilos e também possibilitar a classificação metalogenética do referido corpo segundo Trueman e Cerný (1982).

A partir dos dados da Tabela 2 as amostras de berilo foram classificadas como intermediárias entre berilos livres de álcalis e berilos sódicos, ou correspondentes aos tipos 1 e 3, propostos por Cerný (1975), respectivamente.

Por meio da relação Na/Li versus Cs(%) obtida das análises químicas dos cristais de berilo, lançadas no diagrama de Trueman e Cerný (1982) (Figura 2), pôde-se observar que cinco amostras classificam o pegmatito como sendo do tipo **A** - estéril, portador de Be, Nb, Ta e pobre em álcalis raros. Entretanto três amostras ficaram posicionadas no campo **B**, bem próximo ao limite com o campo A, sendo indicativas do enriquecimento, pouco expressivo, em céσιο e também em álcalis raros, permitindo o enquadramento deste pegmatito como de transição entre os dois tipos, porém mais próximo do tipo **A**.

INCLUSÕES FLUIDAS

Foram estudadas inclusões fluidas em amostras de berilo da zona gráfica (74 inclusões), intermediária (47 inclusões) e de um corpo de substituição (186 inclusões), tendo sido observadas as seguintes características: predominância de inclusões fluidas bifásicas, à temperatura ambiente, essencialmente aquosas, com formas de cristais negativos de seção retangular, com distribuições e modos de ocorrência indicativos de origem primária. Na maioria dos casos orientam-se paralelamente ao eixo *c* do berilo hospedeiro, embora também ocorram inclusões perpendiculares ou inclinadas em relação a esse eixo. Ainda foram observadas inclusões trifásicas a multifásicas, compostas principalmente por H₂O(l), H₂O(v) e fases sólidas anisótropas ocasionais. Inclusões fluidas distribuídas em fraturas cicatrizadas, internas

ao cristal hospedeiro, sugerindo uma origem pseudo-secundária, foram também identificadas. As inclusões estudadas possuem dimensões na faixa de 15 a 50mm, encontrando-se os resultados das análises na Tabela 3.

DADOS OBTIDOS

Os valores das temperaturas do ponto eutético das soluções (Te) foram determinados com bastante cuidado, por se tratarem de fluidos de baixa salinidade que, de acordo com Goldstein e Reynolds (1994) dificultam a observação desse fenômeno. Assim, esse parâmetro foi obtido considerando-se as temperaturas em que a fase líquida já se encontrava bastante visível, sendo, portanto, ligeiramente superiores às Te reais.

Zona gráfica - amostra 5540

As temperaturas do ponto eutético (Figura 3a) das soluções (Te) apresentaram uma ampla faixa de variação (-43 a -19°C), com os seguintes picos de maiores frequências: (a) entre -25 e -19°C, indicativo do sistema H₂O - NaCl - KCl, podendo ainda conter F ou B em solução (Borisenko 1978, Crawford 1981, Davis *et al.* 1990, Smirnov *et al.* 1999); b) -36 a -30°C, mostrando a provável presença de sistemas aquosos com MgCl₂-NaCl, FeCl₃, NaCl-FeCl₂ ou NaCl-FeCl₂-FeCl₃ (Borisenko 1978, Crawford 1981, Davis *et al.* 1990), ou ainda do próprio sistema H₂O-NaCl segundo dados de Goldstein e Reynolds (1994); c) -43 a -37°C, sugerindo a adição de Ca²⁺ ao sistema, responsável pelos decréscimos das Te (Borisenko 1978, Oakes *et al.* 1990, entre outros), ou mesmo de Mg²⁺ (Goldstein e Reynolds 1994). Deve ser ressaltado que essas faixas de temperatura ocorrem em IF próximas e aparentemente primárias, que deveriam conter fluidos de mesma composição. Desse modo, essas variações composicionais poderiam ter sido causadas por modificações nas inclusões originais devido ao aporte posterior de fluidos mais evoluídos.

Os valores das temperaturas de fusão do gelo (T_{fg}), caracteristicamente representado por cristais tipicamente arredondados e de baixo relevo, variaram de -3,5 a -2,0°C (Figura 3b), evidenciando as baixas salinidades das soluções aquosas (equivalentes à 3,3/5,6% em peso do NaCl).

amostra	5455*	5459*	5463*	5529	5540b	5541a	5542	5575
localiz.	Z.I.	C.S.	?	C.S.	Z.G.	C.S.	Z.I.	rej.
SiO ₂	67,40	66,90	67,40	66,90	66,40	66,80	66,10	67,00
TiO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Al ₂ O ₃	19,10	18,40	19,00	17,90	18,20	17,80	18,30	18,20
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0,33	0,33	0,38	0,60	0,41
FeO	-	-	-	0,28	0,40	0,28	0,16	0,20
BeO	9,50	10,80	10,00	11,13	11,20	11,23	11,21	11,17
MnO	-	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	<0,10	0,32	<0,10	0,16	0,18	0,44	0,32	0,04
CaO	-	-	-	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Na ₂ O	0,44	0,31	0,48	0,45	0,25	0,28	0,10	0,19
K ₂ O	0,06	0,02	0,05	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03
Li ₂ O	0,07	0,04	0,07	0,10	0,06	0,03	0,03	0,03
Cs ₂ O	0,24	0,35	0,21	0,16	0,06	0,07	0,07	0,06
Rb ₂ O	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ga ₂ O ₃	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
PF	1,81	1,73	1,81	2,15	2,19	2,19	2,22	2,11
Total	99,41	99,52	99,59	99,68	99,40	99,60	99,21	99,51
Si	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
^{IV} Al	-	-	-	-	-	-	-	-
^{VI} Al	1,985	1,955	1,982	1,931	1,919	1,888	1,910	1,947
Fe ³⁺	-	-	-	0,023	0,023	0,027	0,042	0,029
Fe ²⁺	-	-	-	0,022	0,031	0,022	0,001	0,016
Mn	-	-	-	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mg	0,014	0,044	0,014	0,022	0,025	0,061	0,045	0,006
Ti	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ga	-	-	-	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Soma	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,002	2,000
Be	2,137	2,417	2,237	2,478	2,505	2,500	2,511	2,495
Li	0,026	0,015	0,026	0,037	0,022	0,011	0,011	0,011
Si	0,312	0,231	0,275	0,214	0,183	0,207	0,169	0,213
^{IV} Al	0,121	0,063	0,101	0,028	0,077	0,060	0,101	0,041
Soma	2,596	2,726	2,639	2,760	2,787	2,778	2,792	2,760
Vacância	0,404	0,274	0,361	0,240	0,213	0,222	0,208	0,204
Na	0,080	0,056	0,087	0,081	0,045	0,050	0,018	0,034
K	0,007	0,002	0,006	0,006	0,005	0,002	0,002	0,004
Cs	0,010	0,014	0,008	0,006	0,002	0,003	0,003	0,003
Rb	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
Ca	-	-	-	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
ΣRf	0,098	0,073	0,101	0,095	0,055	0,057	0,026	0,043

Tabela 2: Dados de química mineral de 08 amostras de berilo do Pegmatito Ipê. Os dados analíticos (*) são de Achtschin e Marciano (1996). (- não analisado). [cálculo da fórmula estrutural com base em 18 (O)]. Z.G. - zona gráfica, Z.I. - zona intermediária, C.S. - corpo de substituição e rej. - rejeito.

Table 2: Chemical Data of 08 beryl samples from Ipê Pegmatite. (* - Achtschin e Marciano 1996). (- not analyzed). [calculation structural formulae on 18 (O) basis]. Z.G. - wall zone, Z.I. - intermediate zone, C.S. - substitution body and rej. - reject.

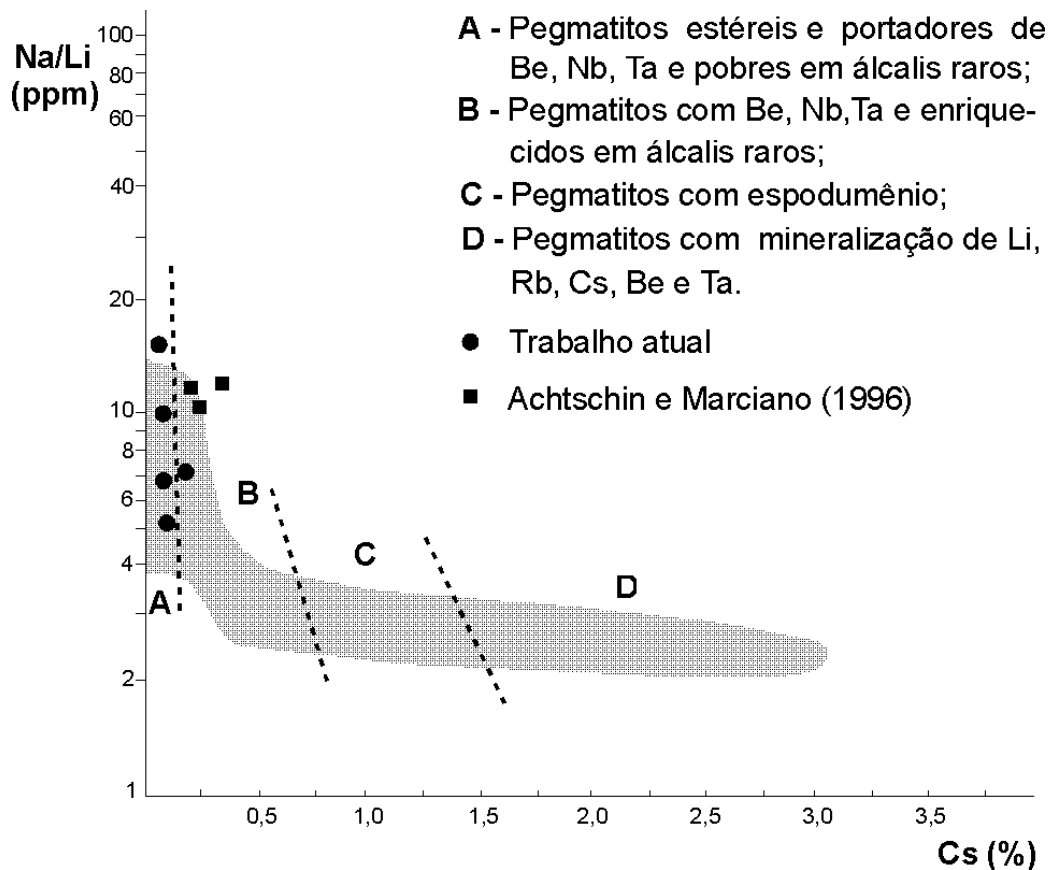


Figura 2: Relação Na/Li versus Cs(%) baseado no diagrama de Trueman e Cerný (1982), onde estão representados 8 cristais de berilo do Pegmatito do Ipê.

Figure 2: Na/Li versus Cs(%) relationship following the Trueman & Cerný (1982) diagram in 8 beryl samples from Ipê Pegmatite.

As temperaturas de homogeneização do fluido (Th) situaram-se numa estreita faixa, com um número máximo de medidas entre 200 e 230°C (Figura 3c).

Zona intermediária - amostra 5542

As Te apresentam variações semelhantes às da amostra anterior, embora com maior concentração de medidas no intervalo de -41 a -35°C (Figura 4a), indicativas da possível presença dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , ou mesmo Fe^{2+} e Fe^{3+} , ao lado do Na^+ , K^+ , e Cl^- nas soluções aquosas, de acordo com os autores mencionados anteriormente.

As Tfg apresentaram variações de -4,0 a -1,5°C, com intervalo de maior frequência situado entre -3,5 e -2,5°C (Figura 4b), indicando também salinidades baixas, equivalentes à 4,1/4,9% em peso do NaCl.

As Th situaram-se, principalmente, entre 180 e 220°C, nas inclusões primárias, sendo esses valores ligeiramente inferiores aos obtidos para o caso da zona gráfica (Figura 4c1). Nas inclusões pseudo-secundárias, onde muitas vezes foram observadas feições indicativas de processo de escape de fluidos e estrangulamento, responsáveis por modificações nas temperaturas de homogeneização (Roedder 1984), estas distribuem-se numa faixa mais extensa, de 130 a 210°C (Figura 4c2).

Corpo de substituição - amostra 5541

As Te das inclusões primárias (Figura 5a1) apresentam dois intervalos de maior frequência, situados entre -23 e -19°C, indicativos dos sistemas NaCl-KCl- H_2O , podendo conter flúor e boro, e entre -47 e -39°C, que sugerem a presença adicional de cátions divalentes, tais como cálcio, magnésio, e/ou ferro nas soluções (Borisenko 1978, Crawford 1981, Davis *et al.* 1990, Goldstein e Reynolds 1994, Smirnov *et al.* 1999, Goldstein 2001). Nas inclusões pseudo-secundárias, as Te variaram, essencialmente, de -47 a -39°C (Figura 5a2), mostrando a maior importância dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e/ou $(Fe)^{2+}$ e/ou 3^+ (Borisenko 1978, Oakes *et al.* 1990, Goldstein e Reynolds 1994, Goldstein 2001).

As Tfg, nos dois casos, situaram-se, principalmente, entre -4,0 e -2,5°C (Figuras 5b1 e 5b2), sendo as salinidades equivalentes à 4,1/6,4% em peso do NaCl.

As Th das inclusões primárias variaram de 180 a 220°C (Figura 5c1). No caso das pseudo-secundárias, ocorre um espalhamento bem maior, estando os valores compreendidos entre 100 e 270°C (Figura 5c2), sendo os valores extremos, provavelmente decorrentes das modificações posteriores ao aprisionamento (Roedder 1984).

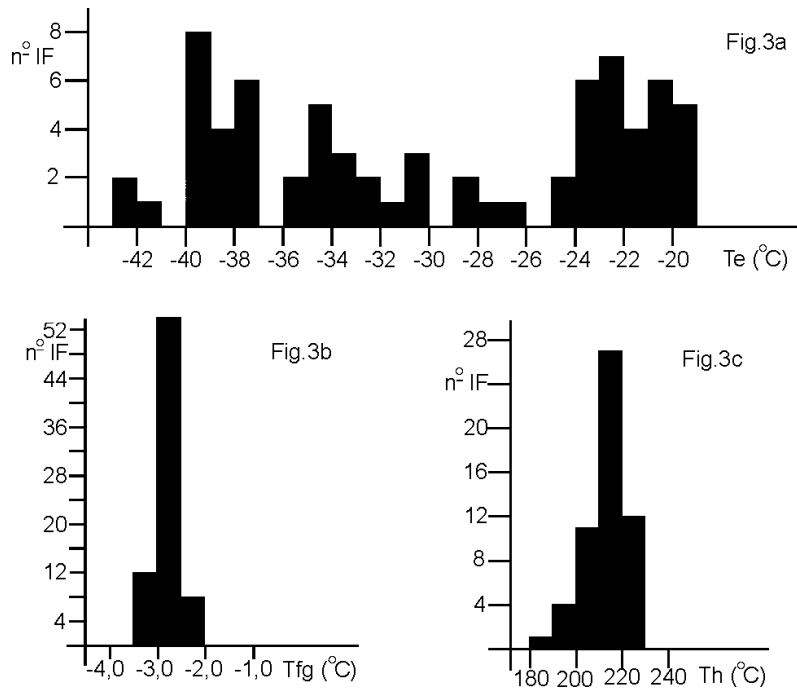


Figura 3: Histogramas representativos das T_e (a), T_{fg} (b) e T_h (c) das inclusões fluidas em berilo da zona gráfica do Pegmatito Ipê.

Figure 3: Representative histograms of the T_e (a), T_{fg} (b) and T_h (c) of the fluid inclusions in beryl within graphic zone of Ipê Pegmatite.

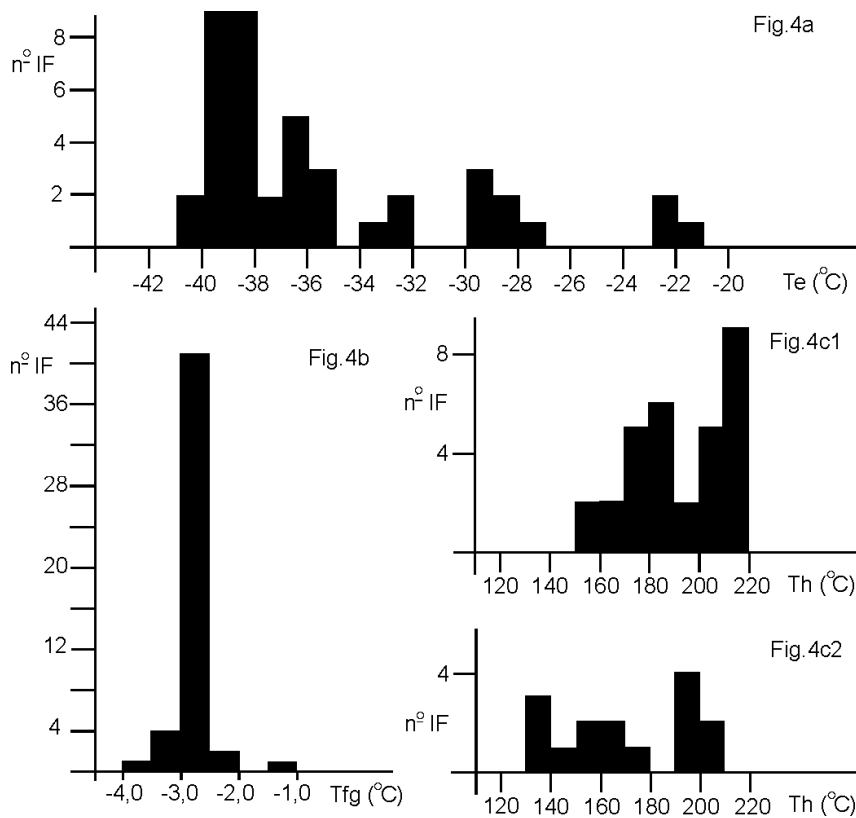


Figura 4: Histogramas representativos das temperaturas de mudança de fase das inclusões fluidas em berilo da zona intermediária do Pegmatito Ipê: (a) T_e ; (b) T_{fg} ; (c1) T_h das IF primárias e (c2) T_h das IF pseudo-secundárias.

Figure 4: Representative histograms of the temperatures of change phase of the fluid inclusions in beryl within intermediate zone of Ipê Pegmatite: (a) T_e ; (b) T_{fg} ; (c1) T_h of primary IF and (c2) T_h of pseudosecondary fluid inclusions.

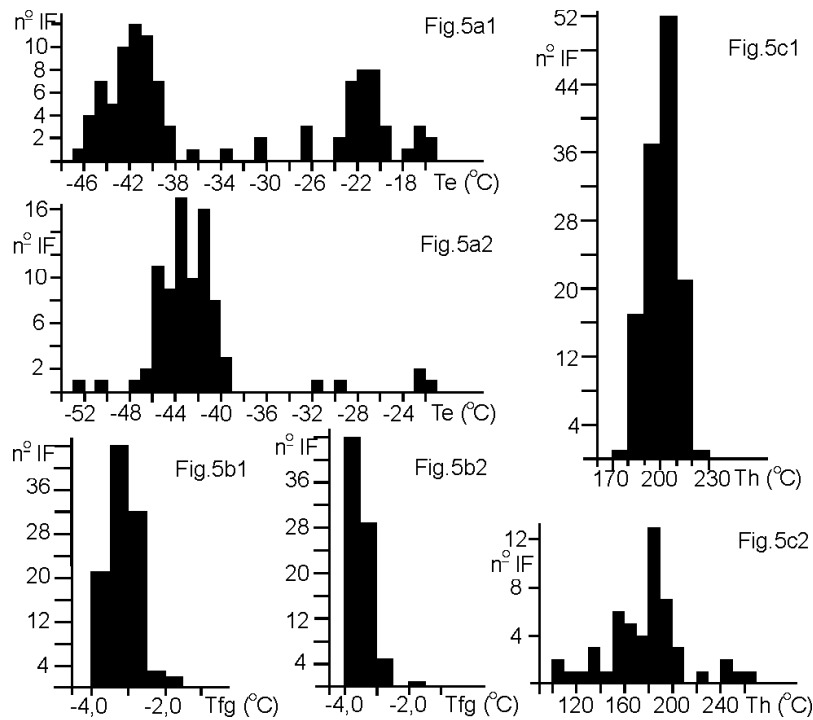


Figura 5: Histogramas representativos das temperaturas de mudança de fase das inclusões fluidas em berilo do corpo de substituição do Pegmatito Ipê: Te - (a1) IF primárias, (a2) IF pseudo-secundárias; Tfg - (b1) IF primárias, (b2) IF pseudo-secundárias; Th - (c1) IF primárias, (c2) IF pseudo-secundárias.

Figure 5: Representative histograms of the temperatures of change phase of the fluid inclusions in beryl of the substitution body of Ipê Pegmatite: fluid inclusions = Te - (a1) primary, (a2) pseudosecondary; Tfg - (b1) primary, (b2) pseudo-secondary; Th - (c1) primary, (c2) pseudosecondary.

DADOS DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

Esse método foi utilizado para a identificação dos possíveis agrupamentos moleculares presentes nas inclusões fluidas de berilo, tais como, água do tipo I e II, CO₂ e CH₄, fornecendo também dados para determinação dos polítipos de berilo.

Para a obtenção dos espectros de absorção no infravermelho (FTIR - infravermelho por transformada de Fourier) foi utilizado um espectrofotômetro Bomem/Hartmann & Braun, modelo MB100C23 com detector MCT, juntamente com uma célula de diamante, modelo SPG 466 (*diamond anvil cell for microbeam*), e uma câmara sob atmosfera inerte com nitrogênio gasoso, pertencente ao Centro de Conservação e Restauração da Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais. Os diagramas foram obtidos a partir de @1mg de cada cristal de berilo finamente moído (200mesh = 0,074mm = 74µm), porém com dimensões suficientes para preservar as inclusões fluidas (15 a 50µm). Os espectros foram registrados na região de 5.300 a 250cm⁻¹, com uma resolução de 4cm⁻¹. A obtenção das leituras das bandas foi realizada por meio do *software Win-Bomem Easy*, versão 3.01C.

As análises por espectroscopia de absorção no infravermelho registraram a presença dos seguintes fluidos, em ordem decrescente de quantidade: H₂O tipo I, CO₂, H₂O tipo II e CH₄.

De um modo geral, os resultados foram similares em todos os casos, havendo, no entanto, um maior conteúdo de CO₂ na amostra 5541a, proveniente do corpo de substituição, quando comparada com a da zona intermediária (5542) e da zona gráfica (5540). As absorções relativas ao estiramento das moléculas de H₂O, da amostra 5542, estão representadas como um 'ruído', e não como as bandas definidas exibidas nos demais espectros, o que as tornam impróprias para avaliação da transmitância referente à água tipo I e II (Tabela 3).

Deve ser ainda observado, que esse método não permite a detecção de substâncias homopolares, como por exemplo o nitrogênio (N₂) passível de estar presente na fase fluida, tendo sido necessário, para tal propósito, a utilização da espectroscopia micro-Raman.

DADOS DE ESPECTROSCOPIA MICRO-RAMAN

As análises por espectroscopia micro-Raman (EMR) foram realizadas nas mesmas seções empregadas nos estudos microtermométricos, tendo sido utilizado um espectroscópio micro-Raman DILOR, modelo XY, do Departamento de Física do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Na amostra de berilo da zona gráfica, análises realizadas em cinco inclusões fluidas detectaram a presença de CO₂ e N₂, dissolvidos na fase vapor da solução aquosa. Esses elementos ocorrem em

quantidades muito pequenas, não tendo sido possível sua identificação por meio dos métodos microtermométricos. Na zona intermediária foram identificadas quantidades relativamente mais elevadas de CO₂, além de pequenas proporções de N₂, em duas inclusões primárias, e traços de CO₂ e N₂ em duas inclusões pseudo-secundárias. Na amostra do corpo de

substituição, além de H₂O, nenhum outro componente foi identificado por esse método nas três inclusões analisadas (Tabela 3).

Observa-se que os resultados das análises por EMR, obtidas em inclusões individuais, não são perfeitamente coincidentes com aqueles relativos ao método FTIR, que utiliza amostras totais. Esses resultados parecem sugerir

Zonas / amostras	Microtermometria			FTIR	micro-Raman
	Te (°C)	Tfg (°C)	Th (°C)		
Zona Gráfica Amostra 5540	-25 a -19 -36 a -30 -43 a -37	-3,5 a -2,0	200 a 230	H ₂ O CH ₄ (fraco) CO ₂	(H ₂ O) CO ₂ N ₂
Zona Intermediária Amostra 5542	-41 a -35	-3,5 a -2,5	180 a 220 130 a 210*	H ₂ O CH ₄ (fraco) —	CO ₂ (H ₂ O) N ₂ CO ₂ (tr)*
Corpo de Substituição Amostra 5541	-23 a -19 -47 a -39	-4,0 a -2,5	180 a 220 100 a 270*	H ₂ O (forte) CH ₄ (forte) CO ₂ (forte)	(H ₂ O)

* - Inclusões pseudo-secundárias

Tabela 3: Dados obtidos a partir de análises por microtermometria, espectroscopia de absorção no infravermelho e espectroscopia micro-Raman em inclusões fluidas em amostras de berilo do Pegmatito Ipê.

Table 3: Data from microthermometric, infrared spectroscopy and micro-Raman spectroscopy analyses in fluid inclusions in beryl of Ipê Pegmatite.

a ocorrência de variações locais nas composições das inclusões fluidas, sendo, portanto, o segundo método mais representativo do comportamento geral das amostras estudadas, em relação à composição dos fluidos.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Análises por DRX, do berilo do Pegmatito Ipê permitiram a classificação desse mineral em três tipos distintos: N, T e N-T. Contudo todos os cristais, segundo a composição química, se apresentam muito mais próximos do tipo N onde a substituição catiônica é pouco significativa (Gandini 1999). Análises químicas de cristais de berilo (Gandini 1999) permitiram sua classificação como do tipo 1 e 3 de Cerný (1975), podendo o pegmatito ser enquadrado como do tipo A de Trueman e Cerný (1982).

Estudos por microscopia de amostras de berilo das zonas gráfica e intermediária e de um corpo de substituição do Pegmatito Ipê revelaram a presença de um grande número de inclusões fluidas primárias de morfologias regulares (cristais negativos), com orientações paralelas, perpendiculares e inclinadas em relação ao eixo c do cristal hospedeiro. Também ocorrem inclusões fluidas pseudo-secundárias em fraturas cicatrizadas, internas ao cristal de berilo.

A microtermometria revelou tratar-se, na maioria das vezes, de inclusões bifásicas, compostas essencialmente por soluções aquosas de baixa salinidade, embora tenha sido registrada a presença de inclusões trifásicas a multifásicas, com fases sólidas ocasionais. Outros métodos de análise mostraram a existência de pequenas quantidades de CO₂ e CH₄ (FTIR), ocorrendo o CO₂ em maior quantidade na amostra proveniente do corpo de substituição, e CO₂ e

N₂ (EMR), em inclusões individuais presentes em cristais de berilo das zonas gráfica e intermediária.

Os dados das temperaturas eutéticas das amostras das zonas gráfica, intermediária e do corpo de substituição, sucessivamente cristalizadas, parecem sugerir a presença de soluções aquosas inicialmente contendo Na⁺, K⁺, com possíveis quantidades de Fe²⁺ e/ou Fe³⁺, que evoluíram para sistemas mais ricos em cálcio e/ou magnésio. Os valores mais baixos de Te também poderiam ser decorrentes de metaestabilidade, devido ao aumento da pressão interna das inclusões com o resfriamento, como discutem Goldstein e Reynolds (1994), embora poucos tenham sido os casos em que houve o desaparecimento da fase vapor durante o processo de criometria, responsável por esse fenômeno.

É digno de nota que, enquanto nas inclusões primárias do berilo do corpo de substituição as Te definem duas faixas distintas (-23/-19°C e -47/-39°C), nas pseudo-secundárias, dispostas em fraturas internas que secionam as anteriores e que representam fluidos relativamente mais evoluídos, as Te praticamente limitaram-se ao intervalo -47/-39°C, tornando evidente a importância do Ca²⁺. Optou-se por uma evolução no sentido de um enriquecimento principalmente em cálcio, com base na ocorrência de apatita e na composição química dos feldspatos associados ao berilo. Deste modo, essa evolução é evidenciada pela presença de albita (com até 10% da molécula anortita) no corpo de substituição, a qual é ausente na zona gráfica e ocorre em pequenas proporções na zona intermediária (Gandini 1999). Além disso, os resultados das análises por FTIR, que utilizam amostra total, mostraram que nos fluidos mais evoluídos também é mais marcante a presença do CO₂. Deste modo, o aporte dessas soluções posteriores teria modificado, em proporções variáveis, as inclusões

originais, principalmente aquelas com maiores dimensões e dispostas paralelamente ao eixo c do berilo, nas quais haveria maior facilidade de escape e troca de fluidos.

Esses processos são também sugeridos pelos dados das temperaturas de homogeneização obtidos para essas amostras. Observa-se que, com exceção do grupo de inclusões fluidas pseudo-secundárias da amostra do corpo de substituição, existem sobreposições nos valores de Th em todos os casos estudados, embora na zona intermediária os resultados obtidos situam-se, de modo coerente, numa faixa ligeiramente inferior aos da zona gráfica. Desse modo, parece ser viável a suposição de que fluidos posteriores possam ter modificado e reequilibrado aqueles, previamente aprisionados nos cristais de berilo das zonas gráfica e intermediária. Assim, atualmente, existem poucos registros das condições originais, estes apenas indicados pelas ligeiras diferenças de Th entre essas duas últimas zonas. No caso das inclusões pseudo-secundárias, a extensa faixa de valores de Th parece realmente mostrar a presença de modificações posteriores ao aprisionamento, por meio de processos, às vezes evidentes, de escape de fluidos e estrangulamento.

AGRADECIMENTOS

R.M. da S. Bello agradece ao CNPq (Processo 303872/85-3); V.R.P.R.O. Marciano e A.L. Gandini, agradecem a Finep e Capes ao suporte financeiro que muito auxiliou a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achtschin A.B., Costa K. de V., Reis L.B. 1996. *Controle litoestrutural do Pegmatito Ipê*. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Trabalho de Graduação, 90 p.
- Achtschin A.B. & Marciano V.R.P.R.O. 1996. *Utilização do berilo na caracterização genética de corpos pegmatíticos da faixa Sabinópolis - Governador Valadares, MG*. Belo Horizonte, 201p. (V Semana de Iniciação Científica - Pró-Reitoria de Pesquisa) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Almeida F.F.M. de 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7:349-364.
- Almeida F.F.M. de, Hasui Y., Brito Neves B.B. de 1976. *The upper Precambrian of South America*. São Paulo, IG-USP,45-80 (Boletim 7)
- Aurischio C., Grubessi O., Zecchini P. 1994. Infrared spectroscopy and crystal chemistry of the beryl group. *Canadian Mineralogist*, 32:55-68.
- Bakakin V.V., Ryllov G.M., Belov N.V. 1970. X-ray diffraction data for identification of beryl isomorphs. *Geochemistry International*, 7:924-933.
- Banko A.G. 1997. *FTIR-spektroskopische untersuchungen na beryllen unterschiedlicher herkunft, sowie die geologische, mineralogische und gemmologische charakterisierung der diamanten des Espinhaço-Gebirges (Minas Gerais, Brasilien)*. Wien. Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien, Tese de Doutorado, 185p.
- Barbosa A.L. de M. 1944. Mica em Governador Valadares. *Mineração e Metalurgia*, 8:29-34.
- Barbosa A.L.M., Grossi Sad J.H., Torres N., Melo M.T.V. 1964. Geologia das quadrículas de Barra de Cuité e Conselheiro Pena, Minas Gerais. Belo Horizonte, *Relatório DNPM/GEOSOL*. 285p.
- Barbosa A.L.M., Grossi Sad J.H., Torres N., Melo M.T.V. 1966. Description of the preliminary geologic map of the Middle Rio Doce. In: INTERNATIONAL FIELD INSTITUTE, Washington, 1966. *Guidebook Brazil*. Washington, American Geological Institute. p. III.1 - III.7.
- Borisenko A.S. 1978. Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Geologiya i Geofizika*, 18:11-19.
- Cerný P. 1975. Alkali variations in pegmatitic beryl and their petrogenetic implications. *Neues Jahrbuch für Mineralogie. Abhandlungen*, 123:198-212.
- Correia Neves J.M., Monteiro R.L.B.B., Dutra C.V. 1984. Composição química de berilos pegmatíticos do Brasil e seu significado petrológico e metalogenético. *Revista Brasileira de Geociências*, 14:137-146.
- 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*, 16:106-118.
- Crawford M.L. 1981. Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. In: Hollister L.S. & Crawford M.L. (eds.) *Fluid inclusions: applications to petrology*. Calgary, Mineralogical Association of Canada, 75-100 (Short Course, handbook, v.6).
- Davis D.W., Lowestein T.K., Spencer R.J. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and NaCl-CaCl₂-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54:591-601.
- Delaney P.J.V. 1996. *Gemstone of Brazil - geology and occurrences*. Ouro Preto, Editora REM. 125p.
- Gandini A.L. 1999. *Aspectos da mineralogia, geoquímica, gênese e potencialidade econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 261p.
- Gandini A.L., Marciano V.R.P.R.O., Bello R.M.S., Svisero D.P. 2000. Ipê Pegmatite. In: César-Mendes J. & Gandini A.L. (eds.), *Guide to the major colored gemstone deposits in the vicinity of Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil, Post-Congress Field Trip. INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31., Rio de Janeiro, Brazil, 2000. Field Trip Aft 20, Rio de Janeiro, SBG., 36-40.*
- GOLDSTEIN R.H. 2001. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos*, 55: 159-193.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J. 1994. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology. 199p. (SEPM - Short course 31).
- Marciano V.R.P.R.O. 1985. *Contribuição ao estudo da mineralogia e geoquímica de pegmatitos da região de Governador Valadares, Minas Gerais*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. Dissertação de Mestrado, 213p.
- Oakes C.S., Bodnar R.J., Simonson J.M. 1990. The system NaCl-CaCl₂-H₂O. I. The ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54:603-610.
- Paiva G. de 1946. *Províncias Pegmatíticas do Brasil*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 13-21 (Boletim 78).
- Pecora W.T., Klepper M.R., Larrabee D.M., Barbosa A.L.M., Frayha R. 1950a. Mica deposits in Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey Bulletin*, 964-C:205-305.
- Pecora W.T., Switzer G., Barbosa A.L., Myers A.T. 1950b. Structure and mineralogy of the Golconda Pegmatite, Minas Gerais, Brazil. *American Mineralogist*, 35:889-901.
- Pedrosa Soares A.C., Dardenne M.A., Hasui Y., Castro F.D.C. de, Carvalho M.V.A. de 1994. *Nota explicativa dos mapas geológico, metalogenético e de ocorrências minerais do Estado de Minas Gerais*. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte, SEME/COMIG, 97p.
- Proctor K. 1985b. Gem pegmatites of Minas Gerais, Brazil: the tourmalines of the Governador Valadares Districts. *Gems & Gemology*, 21:86-104.
- Ribeiro J.H. (coord.) 1997. *Projeto Leste - MG, Folha Marilac SE.23-Z-B-VI - Escala 1:100.000*. Belo Horizonte, SEME/COMIG/CPRM. 48p.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, 12:1-644.

Santos E.G. dos 1985. *Mineralogia e zoneografia do Campo Pegmatítico da Golconda - Município de Governador Valadares - MG*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 96p.

Smirnov S.Z., Peretyazhko I., Prokofiev V., Zagorsky V., Shebanin A.P., Goryainov S. 1999. Daughter sassolite (H_3BO_3) in fluid inclusions: the first evidence of natural fluids with high boron acid content. (Abstract), ECROFI XV, European Current Research on Fluid Inclusions, Abstracts and Program. GeoForschungsZentrum Postdam, Germany, 283-285.

Trueman D.L. & Cerný P. 1982. Exploration for rare element granitic pegmatites. In: Cerný P. (ed.) *Granitic pegmatites in science and industry*. Winnipeg, Mineralogical Association of Canada. 463-493. (Short course handbook, v. 8).

Wegner R. 1983. *Spurenelemente in graniepegmatiten in bundesstaat Minas Gerais, Brasilien, unter besonderer berücksichtigung der feldspäte*. Freiburg, Universidade de Albert-Ludwigs, Tese de Doutorado, 154p.