

A INFLUÊNCIA DA ALCALINIDADE NA CAUSA E MELHORAMENTO DE COR DE BERILO DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL, EM MINAS GERAIS

M. A. Kahwage & J. C. Mendes

Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia (Secretaria de Pós-graduação),
Campus Morro do Cruzeiro s/n, (CEP 35400-000; Ouro Preto, MG. E-mail: makpe@bol.com.br; E-mail: julio@degeo.ufop.br

Recebido em 09/2004; aprovado para publicação em 04/05

ABSTRACT

The beryl from pegmatites of Província Pegmatitica Oriental can be chemically classified as alkaline and not alkaline, due to Li, Cs and Rb placed in its structure through isomorfics substitutions or filling out the open channels. The tenors of alkalis are much higher in beryl originated from differentiated pegmatites (Conselheiro Pena, São José da Safira e Itinga) than in less differentiated pegmatite crystals. However, iron display inverse behavior to alkalinity, being more concentrated in non-alkaline specimens from less differentiated pegmatites (Medina and Carai).

The beryl alkalinity is an important parameter to improve better colors to this mineral. The irradiation of non-alkaline beryl changes the oxidation state of octahedral iron, this process activates the charges transference responsible for absorptions in the visible spectrum generating yellowish colors. In alkaline specimens the irradiation should be avoided, due to great probability of color centers (Tipo Maxixe) formation, that have little commercial acceptance because their instability under light. The irradiation must be applied to non-alkaline goshenites, seeking change iron oxidation state to create yellow colors in beryl (heliodore). In non-alkaline specimens (like aquamarine) heating is the unique applicable treatment, seedling its greenish tonality to blue, because reducing oxidation state of octahedral iron.

RESUMO

O berilo presente nos pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental, posicionada entre o sudeste da Bahia e o sudeste de Minas Gerais, pode ser quimicamente subdividido em alcalino e não alcalino, com base nos teores de Li, Cs e Rb que colocam-se na sua estrutura através de substituições isomórficas ou preenchendo os canais abertos. Nos pegmatitos diferenciados a muito diferenciados (Conselheiro Pena, São José da Safira e Itinga) os teores de álcalis no berilo são bem mais elevados que nos cristais oriundos de pegmatitos pouco diferenciados. Entretanto, o ferro nesses espécimes mostra comportamento inverso ao da alcalinidade, estando mais concentrado nos espécimes não alcalinos de pegmatitos pouco diferenciados (Medina e Carai).

A alcalinidade do berilo pode ser ainda um importante parâmetro na aplicabilidade de tratamentos que visem a melhora de suas cores. A irradiação através de raios gama de berilo não alcalino causa mudanças no estado de oxidação do ferro octaédrico de Fe^{+2} para Fe^{+3} , o qual ativa as transferências de carga responsáveis por absorções no espectro visível que geram cores amareladas. Nos espécimes alcalinos a irradiação deve ser evitada, devido a grande probabilidade de geração de centros de cor tipo maxixe, que possuem pouca aceitação comercial por serem muito instáveis sob a luz solar. O tratamento através de irradiação deve ser preferencialmente aplicado a goshenitas não alcalinas, visando mudar o estado de oxidação do ferro e assim torná-las amarelas (heliodoro). No caso da água-marinha não alcalina, o único tratamento aplicável seria o aquecimento, uma vez que ao reduzir o estado de valência do ferro octaédrico a tonalidade esverdeada muda para azul.

INTRODUÇÃO

Na Província Pegmatítica Oriental, uma faixa NNE-SSW com cerca de 800km de comprimento posicionada desde o sul do Estado da Bahia, passando pelo oeste do Espírito Santo e nordeste e sudeste de Minas Gerais (Paiva 1946), o berilo ocorre nas variedades água-marinha, heliodoro, morganita, goshenita e berilo tipo maxixe, todos oriundos de corpos pegmatíticos encontrados nas regiões de Itinga, São José da Safira, Medina, Carai e Conselheiro Pena (Figura 1).

Nas regiões de Medina e Carai, localizadas no nordeste do Estado de Minas Gerais, ocorrem corpos pegmatíticos pouco diferenciados (*e.g.* Angico e Mucaia) que estão relacionados geneticamente a granitóides tardi-tectônicos do tipo “I” (Pedrosa-Soares *et al.* 2001), onde a presença de berilo em cores de interesse gemológico é freqüente. Nos pegmatitos diferenciados a muito diferenciados derivados de granitóides sin a tardi-tectônicos do tipo “S” (Pedrosa-Soares *et al.* 2001), predominantes nas regiões de Conselheiro Pena (Candinho, Eduardo, Ciganinha e Morganita), São José da Safira (Sexta-Feira, Cavalo Morto e Marcelo) e Itinga (Zé da Estrada e Urubu), a água-marinha gemológica ocupa somente as zonas murais enquanto os berilos alcalinos

(morganita, goshenita e tipo maxixe) posicionam-se na zona intermediária ou em corpos de substituição.

A causa de cor no berilo tem origem em cátions ou moléculas, que se colocam na estrutura desse mineral através de substituições isomórficas ou preenchendo os canais abertos entre os anéis tetraédricos de silício na estrutura do berilo. A presença desses elementos depende da composição do líquido e do processo de cristalização do pegmatito, estando os cátions alcalinos (Cs^+ , Na^+ , Rb^+ , Li^+) mais concentrados nas fases residuais, o que se reflete nos percentuais consideráveis observados no berilo das zonas mais internas de corpos diferenciados. A eficácia dos tratamentos que visam o melhoramento das cores do berilo gemológico, depende inteiramente da concentração de cátions cromóforos como: Fe^{2+} , Fe^{3+} e Mn^{2+} , (Wood & Nassau 1968, Loeffler & Burns 1976, Goldman *et al.* 1978, Nassau 1984, Mathew *et al.* 1998), os quais são os principais responsáveis pelas absorções no espectro visível.

METODOLOGIA

As análises químicas obtidas nas 51 amostras de berilo foram realizadas na GEOSOL, através de espectroscopia de emissão atômica por plasma (ICP) e fluorescência de raios X; os

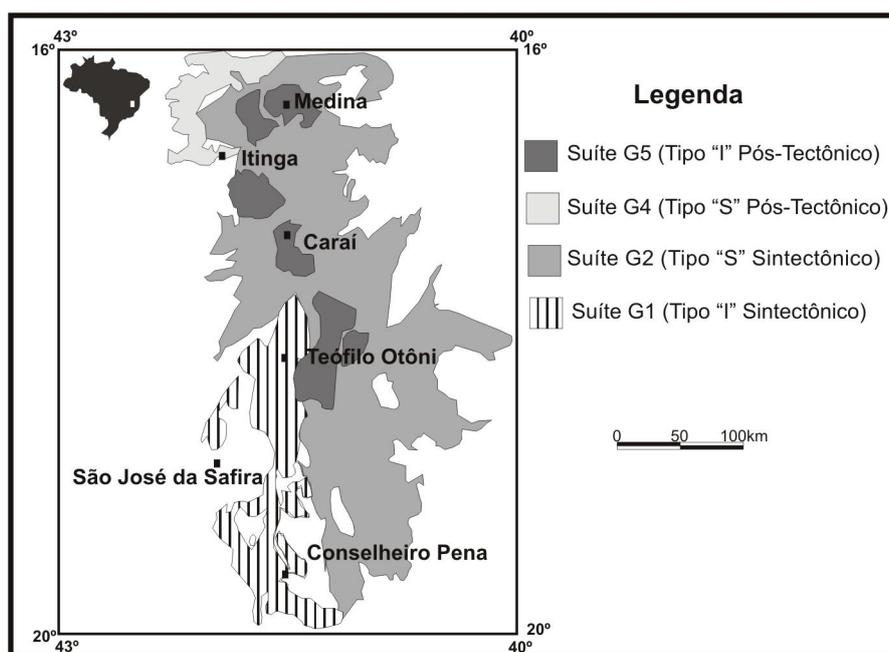


Figura 1 – As regiões produtoras de berilo gemológico abordadas no presente trabalho e os terrenos granitóides brasileiros da Província Pegmatítica Oriental em Minas Gerais (Modificado de Pedrosa-Soares *et al.* 2001).

índices de refração foram medidos em refratômetro para sólidos, modelo TOPCON, no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (DEGEO/UFOP) e os espectros de absorção óptica no visível em espectrofotômetro Hitachi (U-1603), no Centro de Desenvolvimento Tecnológico Nuclear (CDTN - Belo Horizonte). Os espectros de absorção no infravermelho (FTIR), aplicada na identificação dos grupamentos moleculares presentes no berilo, foram obtidos em espectrofotômetro Bomem/Hartmann & Braun, modelo MB100C23, pertencente à Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais (EBA/UFMG). No tratamento por irradiação foram utilizados raios-g provenientes de células de Co_{60} , com dosagem total de 5MGy (até 500MRAD), no irradiador da Empresa Brasileira de Radiação (EMBRARAD). Após a irradiação, essas amostras foram aquecidas a uma taxa de 20°C/min, até temperaturas em torno de 300°C.

ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERSUS COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Quando posicionado no diagrama índice de refração *versus* teor de álcalis, o berilo pesquisado exibe diferenças marcantes, que se devem a variações nos teores de Li^+ , Cs^+ e Na^+ (Sinkankas & Read 1986). Na Figura 2, o berilo com achatamento ao longo do eixo *c* proveniente das lavras Urubu (Itinga) e Morganita (Conselheiro Pena) exibe os maiores valores de índice de refração. Segundo Radcliffe & Campbell (1966) tal fato se deve a substituição de Li^+ por Be^{+2} no sítio tetraédrico e compensação de carga por álcalis de raios iônicos grandes como Cs^+ e Rb^+ , nos canais. Esses cátions causam repulsão eletrostática entre os canais, dificultando o crescimento ao longo do eixo *c* do berilo e alterando tanto a estrutura quanto as propriedades ópticas desse mineral (índice de refração). No berilo de corpos pegmatíticos pouco diferenciados, como o das lavras Angico, Mucaia, Candinho e Ciganinha, o teor de álcalis é menor, estando as substituições nos sítios do Be quase nulas, o que explica os baixos valores de índice de refração (Figura 2).

O comportamento dos íons cromóforos no berilo segue padrão inverso ao da alcalinidade,

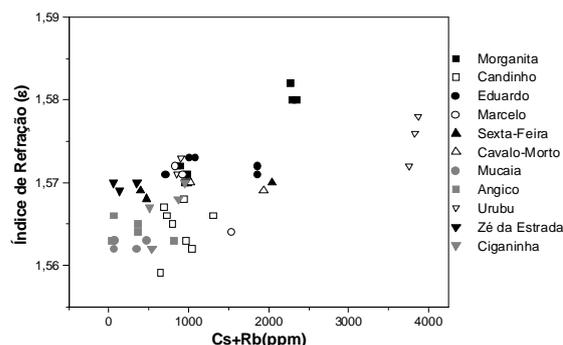


Figura 2 - A relação entre índice de refração e o teor de álcalis nas amostras de berilo obtidas em pegmatitos das regiões de Itinga (Urubu e Zé da Estrada), Medina (Angico), São José da Safira (Sexta-feira, Marcelo e Cavalto-Morto), Carai (Mucaia) e Conselheiro Pena (Morganita, Candinho, Eduardo e Ciganinha), todas no Estado de Minas Gerais.

estando o Fe muito mais concentrado nos espécimes de pegmatitos pouco diferenciados, que possuem teores de álcalis inferiores aos observados nos de corpos diferenciados (Figura 3). No berilo de corpos diferenciados, o Mn apresenta-se em concentrações elevadas apenas nos cristais com alto teor de álcalis (Figura 3).

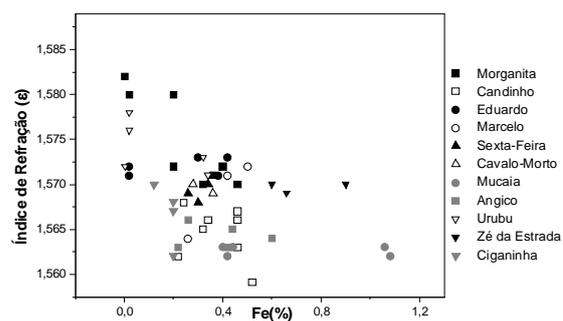


Figura 3 - Relação entre índice de refração e teor de Fe no berilo de Itinga (Urubu e Zé da Estrada), Medina (Angico), São José da Safira (Sexta-feira, Marcelo e Cavalto-Morto), Carai (Mucaia) e Conselheiro Pena (Morganita, Candinho, Eduardo e Ciganinha).

ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

As análises de berilo por espectrometria de absorção no infravermelho possibilitaram a identificação de dois tipos de moléculas de H_2O nos canais abertos (Wood & Nassau 1967). Com exceção do berilo das lavras Angico, Mucaia, Candinho e Ciganinha, detectou-se tanto a presença de vibrações características de moléculas de H_2O do tipo I ($3661-3662cm^{-1}$ e $1595-1594cm^{-1}$) quanto do tipo II ($1627-1628cm^{-1}$, $3595-3597cm^{-1}$ e $3697-3698cm^{-1}$). A presença de H_2O do tipo II indica concentração significativa de metais alcalinos nos canais,

causando rotação das moléculas de H₂O do tipo I devido a atração eletrostática entre os cátions e o oxigênio central (Wood & Nassau 1967). A alcalinidade acentuada no berilo, evidenciada pela ocorrência de H₂O do tipo II, pode ser diretamente atribuída às condições diferenciadas a muito diferenciadas dos pegmatíticos. A molécula de CO₂, centrada no pico 2354cm⁻¹, está presente em todos as amostras, exceto naquelas do tipo berilo “maxixe” da Lavra do Urubu (Figura 4).

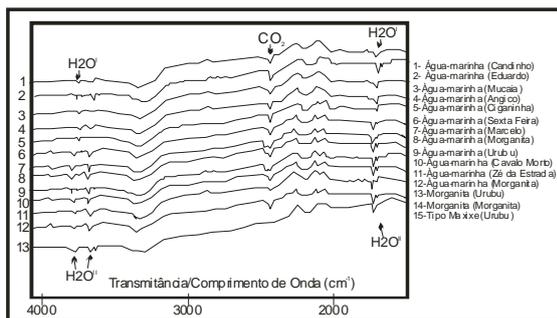


Figura 4 - Espectros de absorção no infravermelho no berilo das regiões de Itinga (Urubu e Zé da Estrada), Medina (Angico), São José da Safira (Sexta-feira, Marcelo e Cavalto Morto), Carai (Mucaia) e Conselheiro Pena (Morganita, Candinho, Eduardo e Ciganinha) no Estado de Minas Gerais.

A CAUSA DE COR E SEU POSSÍVEL MELHORAMENTO

Nos espécimes das minas estudadas, a cor na maioria das vezes relaciona-se a elementos de transição como o Fe e Mn, os quais introduzem-se na estrutura por substituição isomórfica ou preenchendo os canais. Estes elementos interagem com o oxigênio vizinho, causando absorções de determinados comprimentos de onda no espectro visível.

A água-marinha (Tabela 1) mostra uma região absorbante situada na faixa espectral entre 510 e 650nm (Wood & Nassau 1968), com dois picos centrados em 579 e 635nm, referentes ao verde amarelado e amarelo, resultando na transmissão da cor azul (Figura 5). Constataram-se teores de FeO* mais elevados nessa variedade gemológica (Figura 6), indicando que existe relação entre a intensidade de azul e o teor de ferro. A absorção na faixa espectral entre 550 e 650nm (transmissão no azul) resulta da transferência de carga intervalente (IVCT) entre o Fe⁺² nos canais abertos e o Fe⁺³ octaédrico (Goldman *et al.* 1978).

O matiz amarelo, faixa espectral 450nm, se deve à transferência de carga (TC) entre o Fe⁺³ no sítio octaédrico e os oxigênios vizinhos (Mathew *et al.* 1998). Tal fato explica os teores elevados de FeO* (Tabela 1 e 2) observados na variedade amarela de berilo (Figura 6).

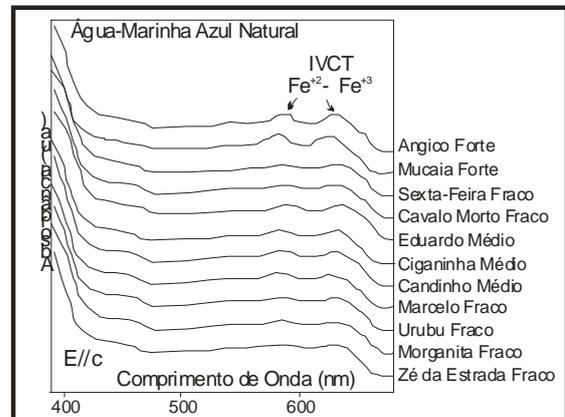


Figura 5 – Espectros de absorção óptica no visível no berilo das regiões de Itinga (Urubu e Zé da Estrada), Medina (Angico), São José da Safira (Sexta-feira, Marcelo e Cavalto Morto), Carai (Mucaia) e Conselheiro Pena (Morganita, Candinho, Eduardo e Ciganinha) no Estado de Minas Gerais.

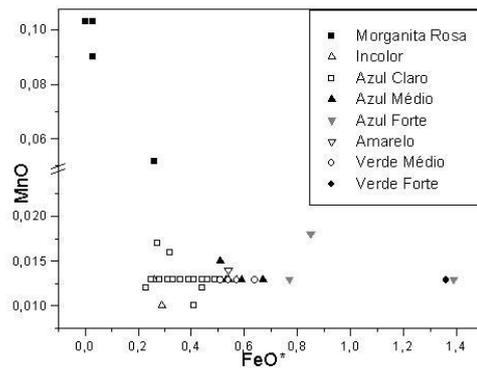


Figura 6 - A relação entre os teores de FeO* e MnO nas amostras de berilo das lavras Angico, Mucaia, Urubu, Zé da Estrada, Morganita, Candinho, Eduardo, Marcelo, Ciganinha, Sexta Feira e Cavalto Morto.

Os espectros de absorção óptica da morganita mostram absorção na faixa entre 460 e 520nm, uma transição entre o azul e o verde que resulta na cor rosa (Figura 8). Nas tabelas 1 e 2 as análises químicas de morganita mostram concentrações de MnO situadas entre 0,04 e 0,1%, bem mais elevadas que nas outras variedades, indicando que o Mn²⁺ seja o principal responsável pela cor rosa (Figura 7). O teor de FeO* é inferior ao da água-marinha e heliodoro (Figura 8), sendo provavelmente responsável pela tonalidade laranja, devido à transferência de carga entre o Fe⁺³ e seus oxigênios vizinhos, gerando o amarelo (Loeffler & Burns 1976).

Tabela 1 - Análises químicas através de ICP e fluorescência de raios-X (Li_2O , Cs_2O e Rb_2O) no berilo estudado na Província Pegmatítica Oriental (os valores representam as médias e desvios dos conjuntos de amostras). Na denominação das lavras as iniciais indicam localização, como por exemplo CP= Conselheiro Pena, SJ= São José da Safira, CA=Carai, ME=Medina e AR=Araçuaí.

Lavra	Cor	FeO*	MnO	Na ₂ O	Cs ₂ O	Rb ₂ O	Li ₂ O
CP-Candinho	Azul Claro	0,5±0,145	0,01±0	0,54±0,068	0,11±0,029	0,015±0,005	0,295±0,056
CP-Ciganinha	Azul Claro	0,205±0,055	0,01±0	0,52±0,106	0,085±0,026	0,015±0,006	0,23±0,055
CP-Eduardo	Azul Claro	0,21±0,24	0,01±0	1,06±0,683	0,075±0,063	0,105±0,107	0,155±0,133
CP-Eduardo	Verde Claro	0,54	0,01	0,36	0,13	0,01	0,15
CP-Morganita	Azul Médio	0,5±0,192	0,015±0,004	0,43±0,37	0,13±0,041	0,01±0,057	0,096±0,22
CP-Morganita	Azul Claro	0,385±0,132	0,01±0,002	0,635±0,292	0,11±0,015	0,015±0,006	0,24±0,04
CP-Morganita	Rosa	0,165±0,146	0,07±0,032	0,78±0,064	0,295±0,01	0,035±0,01	0,53±0,015
SJ-Cavalo Morto	Azul Claro	0,41±0,071	0,01±0	0,39±0,099	0,19±0,071	0,02±0,014	0,175±0,064
SJ-Sexta Feira	Azul Claro	0,385±0,055	0,01±0,002	0,25±0,021	0,16±0,136	0,015±0,006	0,08±0,021
SJ-Marcelo	Verde Médio	0,64	0,01	0,44	0,1	0,02	0,24
SJ-Marcelo	Azul Médio	0,435±0,148	0,01±0	0,52±0,141	0,15±0,057	0,02±0	0,315±0,092
ME-Angico	Amarelo	0,77	0,01	0,24	0,04	0,01	0,04
ME-Angico	Azul Claro	0,305±0,035	0,01±0	0,14±0,14	0,065±0,049	0,01±0	0,125±0,035
ME-Angico	Verde Médio	0,54	0,01	0,05	0,03	0,01	0,2
ME-Angico	Azul Médio	0,57	0,01	0,19	0,04	0,01	0,03
CA-Mucaia	Verde Forte	1,1±0,159	0,01±0,02	0,07±0,51	0,01±0,029	0,01±0,02	0,01±0,023
CA-Mucaia	Azul Médio	0,54	0,01	0,07	0,01	0,01	0,01
CA-Mucaia	Azul Forte	1,39	0,01	0,51	0,04	0,01	0,04
AR-Urubu	Incolor	0,01	0,02	0,71	0,45	0,08	0,43
AR-Urubu	Rosa	0,03±0	0,095±0,007	0,76±0,014	0,47±0	0,007±0	0,41±0,04
AR-Urubu	Azul Claro	0,425±0,021	0,01±0	0,09±0	0,42±0,007	0,005±0,007	0,35±0,02
AR-Zé Estrada	Azul Claro	0,85	0,02	0,15	0,01	0,01	0,02
AR-Zé Estrada	Incolor	0,27	0,02	0,13	0,03	0,02	0,01

O berilo tipo maxixe (morganita) mostra espectros de absorção óptica com transmissão quase total de luz, fato que se deve a centros de cor como o NO_3 ou CO_3 , muito instáveis sob a luz solar (Nassau 1984). Após a irradiação, os espectros de absorção óptica mostram o azul proveniente (565-590nm e 620-650nm) dos

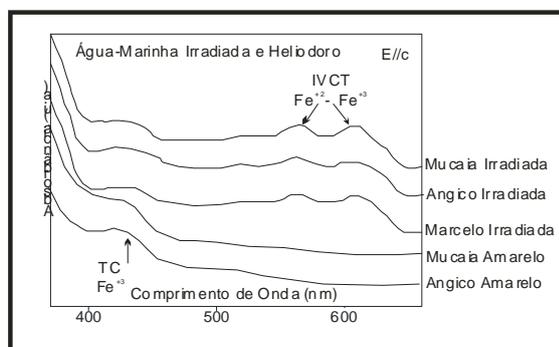


Figura 7 - Espectro de absorção óptica no visível após a irradiação e tratamento térmico da água-marinha das regiões de Itinga, Medina, São José da Safira, Carai e Conselheiro Pena, no Estado de Minas Gerais.

centros de cor e o amarelo (440-470nm) devido à transferência de carga entre Fe^{+3} no sítio octaédrico e oxigênio vizinho (Figura 8).

Quando irradiadas a 5MGy, as cores azul e rosa da água-marinha e da morganita permanecem inalteradas, pois somente o estado de valência do ferro octaédrico é afetado [$\text{Fe}^{+2} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{+3} + e^-$ (Nassau 1984)]. Neste novo estado de oxidação inicia-se a transferência de carga entre o Fe^{+3} e oxigênio vizinho (Goldman *et al.* 1978), levando a uma mudança da cor rosa da morganita para o laranja e o azul da água-marinha se torna verde (Figuras 6 e 8).

A irradiação de berilo tipo maxixe, a 5MGy, induz a formação de centros de cor azul [$\text{NO}_3^- + h\nu \rightarrow \text{NO}_3 + e^- \rightarrow e^- + R \rightarrow \text{NO}_3 + \text{R}^0$ ou $\text{CO}_3^{2-} + h\nu \rightarrow \text{CO}_3^- + e^- \rightarrow e^- + R \rightarrow \text{CO}_3^- + \text{R}^0$, onde $\text{R}=(\text{Li}^+ \text{ e/ou } \text{H}^+)$ (Nassau 1984)]. A componente amarela residual deve-se a

Tabela 2 - Análises químicas através de ICP e fluorescência de raios-X (Li₂O, Cs₂O e Rb₂O) no berilo estudado na Província Pegmatítica Oriental (análises completas).

Lavra	Cor	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B	BeO	FeO	K ₂ O	Li ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	Cs ₂ O	Rb ₂ O	H ₂ O	Total
Candinho	Azul claro	65,12	17,43	0,40	13,44	0,41	0,01	0,29	0,03	0,01	0,51	0,10	0,01	2,00	99,77
Candinho	Azul claro	64,44	18,62	0,90	13,45	0,44	0,01	0,25	0,03	0,01	0,44	0,09	0,01	1,20	99,90
Candinho	Azul claro	64,05	17,83	0,50	13,39	0,59	0,02	0,32	0,07	0,01	0,57	0,09	0,01	2,50	99,95
Candinho	Azul claro	64,92	19,17	0,90	13,54	0,67	0,02	0,20	0,07	0,01	0,40	0,08	0,01	0,00	100,00
Candinho	Azul claro	63,47	16,64	0,90	13,42	0,28	0,01	0,23	0,02	0,01	0,51	0,13	0,02	1,00	96,64
Candinho	Azul claro	66,18	17,83	0,40	13,37	0,31	0,02	0,34	0,02	0,01	0,57	0,11	0,02	0,60	99,79
Candinho	Azul claro	62,89	16,64	0,80	13,24	0,59	0,01	0,19	0,02	0,01	0,44	0,17	0,02	1,00	96,02
Candinho	Azul claro	64,34	17,83	0,70	13,42	0,59	0,01	0,30	0,05	0,01	0,57	0,12	0,02	1,00	98,96
Ciganinha	Azul claro	65,60	18,62	0,80	13,47	0,26	0,01	0,25	0,02	0,01	0,62	0,06	0,01	0,25	99,98
Ciganinha	Azul claro	64,15	19,02	0,50	13,49	0,26	0,01	0,25	0,02	0,01	0,62	0,06	0,01	1,20	99,59
Ciganinha	Azul claro	63,95	18,22	1,00	13,38	0,26	0,02	0,34	0,02	0,01	0,65	0,10	0,02	1,34	99,32
Ciganinha	Azul claro	64,05	18,62	0,90	13,46	0,15	0,01	0,21	0,02	0,01	0,42	0,11	0,02	1,70	99,68
Eduardo	Azul claro	64,83	17,83	0,50	13,53	0,49	0,01	0,19	0,02	0,01	0,38	0,08	0,02	2,00	99,89
Eduardo	Azul claro	62,60	19,02	0,20	13,75	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	1,62	0,01	0,20	2,00	99,49
Eduardo	Azul claro	62,60	19,02	0,20	13,75	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	1,62	0,01	0,20	1,00	98,49
Eduardo	Verde claro	62,69	17,43	0,70	13,32	0,54	0,01	0,15	0,03	0,01	0,36	0,13	0,01	3,00	98,40
Eduardo	Azul claro	62,89	17,83	0,70	13,38	0,39	0,02	0,29	0,02	0,00	0,50	0,14	0,01	2,50	98,66
Morganita	Azul médio	63,95	17,83	0,80	13,47	0,41	0,01	0,26	0,02	0,02	0,46	0,13	0,01	2,00	99,37
Morganita	Azul médio	63,95	18,62	0,10	13,47	0,59	0,04	0,22	0,02	0,01	0,40	0,13	0,01	2,00	99,56
Morganita	Azul claro	66,86	17,43	0,50	13,43	0,51	0,01	0,22	0,02	0,01	0,39	0,12	0,01	0,23	99,74
Morganita	Azul claro	62,11	18,22	0,80	13,41	0,46	0,00	0,18	0,02	0,01	0,36	0,13	0,01	3,50	99,22
Morganita	Azul claro	64,92	19,02	0,70	13,46	0,26	0,02	0,26	0,02	0,01	0,88	0,10	0,02	0,20	99,86
Morganita	Rosa	62,99	19,41	0,50	12,98	0,03	0,02	0,52	0,02	0,04	0,78	0,30	0,04	2,00	99,61
Morganita	Rosa	65,02	19,02	0,50	12,95	0,26	0,04	0,51	0,02	0,05	0,89	0,31	0,02	0,20	99,78
Morganita	Rosa	62,40	19,41	0,80	12,93	0,00	0,02	0,54	0,02	0,10	0,78	0,29	0,03	1,00	98,33
Cav. Morto	Azul claro	63,37	16,64	0,80	13,35	0,46	0,01	0,22	0,02	0,01	0,46	0,24	0,03	3,00	98,61
Cav. Morto	Azul claro	64,54	17,83	0,60	13,54	0,36	0,04	0,13	0,03	0,01	0,32	0,14	0,01	1,00	98,55
S. Feira	Azul claro	64,63	17,83	0,70	13,49	0,33	0,00	0,06	0,03	0,01	0,23	0,04	0,01	2,00	99,38
S. Feira	Azul claro	64,44	17,83	0,70	13,64	0,39	0,04	0,07	0,03	0,01	0,26	0,05	0,01	2,00	99,46
S. Feira	Azul claro	62,99	18,22	0,50	13,50	0,44	0,01	0,10	0,05	0,01	0,27	0,28	0,02	3,00	99,38
Marcelo	Verde médio	65,21	17,04	0,80	13,45	0,64	0,02	0,24	0,02	0,01	0,44	0,10	0,02	1,00	99,00
Marcelo	Azul médio	65,31	18,22	0,40	13,38	0,54	0,02	0,38	0,03	0,01	0,62	0,11	0,02	0,53	99,58
Marcelo	Azul médio	63,76	18,22	0,70	13,36	0,33	0,02	0,25	0,02	0,01	0,42	0,19	0,02	1,00	98,31
Angico	Verde médio	65,12	17,83	0,60	13,78	0,54	0,01	0,00	0,02	0,01	0,05	0,00	0,00	1,00	98,96
Angico	Azul claro	64,34	18,22	0,70	13,77	0,33	0,01	0,00	0,02	0,01	0,04	0,00	0,00	2,21	99,68
Angico	Amarelo forte	63,28	16,24	0,70	13,74	0,77	0,01	0,04	0,02	0,01	0,24	0,04	0,01	3,00	98,10
Angico	Azul médio	63,18	17,04	0,65	13,74	0,57	0,01	0,03	0,02	0,01	0,19	0,04	0,01	3,00	98,49
Angico	Azul claro	63,86	18,22	0,80	13,50	0,28	0,01	0,10	0,02	0,01	0,24	0,10	0,01	2,30	99,46
Mucaia	Verde amarelado	64,54	17,83	0,70	13,77	0,51	0,01	0,01	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00	1,50	98,97
Mucaia	Azul médio	63,95	17,83	0,80	13,73	0,54	0,01	0,00	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00	2,00	98,97
Mucaia	Ázul forte	63,66	15,45	0,80	13,74	1,39	0,02	0,04	0,17	0,01	0,51	0,04	0,01	3,00	98,85
Mucaia	Verde forte	63,76	15,25	0,90	13,68	1,36	0,02	0,05	0,15	0,01	0,54	0,06	0,01	3,00	98,80
Mucaia	Verde amarelado	63,76	16,64	0,45	13,76	0,57	0,01	0,00	0,02	0,01	0,07	0,01	0,00	3,00	98,30
Urubu	Azul claro	65,31	19,02	0,55	13,86	0,41	0,00	0,01	0,03	0,01	0,09	0,13	0,00	0,20	99,63
Urubu	Azul claro	65,80	18,62	0,90	13,64	0,44	0,00	0,01	0,03	0,01	0,09	0,12	0,01	0,10	99,77
Urubu	Incolor	63,57	19,60	0,40	12,94	0,00	0,02	0,43	0,02	0,02	0,71	0,45	0,08	1,00	99,24
Urubu	Rosa	63,47	19,02	0,70	13,00	0,03	0,02	0,41	0,02	0,10	0,75	0,47	0,07	1,00	99,05
Urubu	Rosa	62,79	19,41	0,50	12,94	0,03	0,02	0,39	0,02	0,09	0,77	0,46	0,08	1,00	98,50
Z Estrada	Azul claro	64,44	16,24	0,80	13,74	0,32	0,00	0,01	0,02	0,02	0,13	0,00	0,00	2,00	97,73
Z Estrada	Azul médio	65,31	16,04	1,00	13,73	0,85	0,00	0,02	0,02	0,02	0,15	0,01	0,00	1,67	98,82
Z Estrada	incolor	65,60	16,24	1,50	13,76	0,27	0,01	0,01	0,10	0,02	0,13	0,03	0,02	0,21	97,90

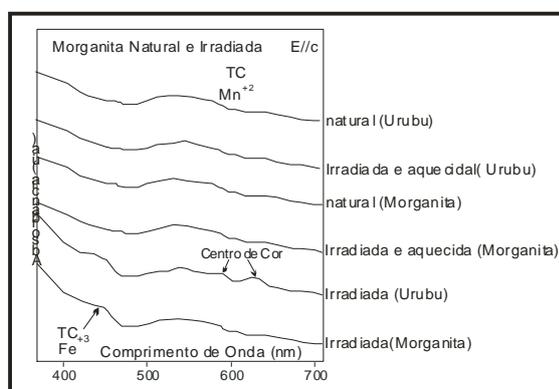


Figura 8 - Espectro de absorção óptica no visível antes e após os tratamentos radioativo e térmico de morganita e berilo tipo Maxixe das regiões de Itinga, Medina, São José da Safira, Carai e Conselheiro Pena, no Estado de Minas Gerais.

transferência de carga entre o Fe⁺³ e o oxigênio vizinho (Figura 7).

CONCLUSÕES

No berilo de corpos menos diferenciado como Mucaia e Angico, localizados na região de Carai e Medina (MG), o ferro ocorre em concentração expressiva, tanto substituindo o alumínio no sítio octaédrico quanto nos canais abertos. As variedades oriundas de pegmatitos bastante diferenciados (Urubu e Morganita), possuem teores baixos de FeO* e alta concentração de álcalis e por esse motivo foram denominadas como berilo alcalino. A presença

de cátions alcalinos é explicada pela substituição isomórfica do Be^{2+} pelo Li^+ , que causa um desequilíbrio eletrostático, o qual é neutralizado por cátions alcalinos de raio iônico grande nos canais abertos (Radcliff & Campbell 1966). A presença desses álcalis foi confirmada tanto por análises indiretas, índice de refração e espectroscopia no infravermelho, quanto por análises químicas quantitativas (*e.g* ICP).

A maior eficiência de tratamento por irradiação foi observada no berilo não alcalino, pois as variedades alcalinas apresentam grande probabilidade de formação de centros de cor do

tipo maxixe (Kahwage 2000; Krambrock 2002), que por serem instáveis não possuem aceitação comercial. O tratamento através de irradiação deve ser principalmente aplicado em goshenita não alcalina, visando mudar o estado de oxidação do Fe^{+2} octaédrico para Fe^{+3} e assim torná-la amarela (heliodoro). Um tratamento similar poderia ser aplicado na morganita, entretanto os baixos teores de FeO apontam mudanças de cores pouco intensas. No caso da água-marinha não alcalina, o único tratamento aplicável seria o aquecimento, uma vez que ao reduzir-se o estado de valência do Fe^{+3} presente no sítio octaédrico, a tonalidade esverdeada muda para azul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Goldman, D. S., Rossman, G. R., Parkin, K. M. (1978). Channel constituents in beryls. *Physics and Chemistry of Minerals*, **3**:225-235.
- Kahwage, M. A. (2000). *Minerais Gemológicos da Região de Araçuaí-Itinga (MG): Modo de Ocorrência, Características e Métodos de Beneficiamento*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 133p.
- Krambrock, K., Pinheiro, M. V. B., Guedes, K. J., Medeiros, S. M., Schweizer, Castañeda, C., Botelho, N. F., Pedrosa-Soares, A. C. (2002). Radiation-induced centers in Cs-rich beryl studied by magnetic resonance, infrared and optical spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Article in Press (NIMB 45272) 6p.
- Loeffler, B. M., Burns, R. G. (1976). Shedding light on the color of gem minerals. *American Scientist.*, **64**(6):636-647.
- Mathew, R. V., Karanth, T. K., Gundu, R., Desphande, R. S. (1998). Maxixe type colour center in natural colourless beryl from Orissa, Índia: an ESR and OA investigation. *Journal of Gemmology*, **26**(4):238-251.
- Nassau, K. (1984). *Gemstone Enhancement*. Butterworths. Ed. Buttler & Tanner, London. 221p.
- Paiva, G. 1946. *Províncias Pegmatíticas do Brasil*. Boletim. DNPM/DFPM, **78**:13-21.
- Pedrosa-Soares, A.C. ; Noce, C. M. ; Wiedmann, C.M. ; Pinto, C. P. (2001). The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gowanaland assembly. *Precambrian Research*. **110**:307-323.
- Radcliff, D. & Campbell, F. A. (1966). Beryl from Birch Portage, Saskatchewan. *Canadian Mineralogist*, **8**:493-505.
- Sinkankas, J. & Read, P. G. (1986). *Beryl*. Ed. Butterworths & Co (Publishers) Ltda. Garden City, Great Britain. 225p.
- Wood, D. L. & Nassau, K. (1967). Infrared spectra of foreign molecules in beryl. *Journal of Chemistry and Physics*, **47**:2220-2228.
- Wood, D. L. & Nassau, K. (1968). The characterization of beryl and emerald by visible and infrared absorption spectroscopy. *American Mineralogist*, **53**:777-800.