

Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Contribuição ao Estudo Mineralógico dos Cristais de Esmeralda do Distrito Mineiro de Campos Verdes, Estado de Goiás

Gênova Maria Pulz, Tania Mara Martini Brum, Pedro Luiz Juchem, Luis José Homem D'el-Rey Silva, Leonel Barros Neto, Polyana Barreto
Pesquisas em Geociências, 25 (2): 11-19, set./dez., 1998.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21159>

Publicado por

Instituto de Geociências



Portal de Periódicos **UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - set./dez., 1998.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Contribuição ao Estudo Mineralógico dos Cristais de Esmeralda do Distrito Mineiro de Campos Verdes, Estado de Goiás

GÊNOVA MARIA PULZ¹; TANIA MARA MARTINI BRUM²; PEDRO LUIZ JUCHEM²; LUIS JOSÉ HOMEM D'EL-REY SILVA³; LEONEL BARROS NETO^{3,4} & POLYANA BARRETO¹

(Recebido em 02/98. Aceito para publicação em 10/98)

¹ Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica – CPGq-, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001- CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Laboratório de Gemologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Caixa Postal 15001- CEP 91509-900, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, CEP 70910-750, Brasília, DF, Brasil.

⁴ Mineração Peneri, CEP 74001-970, Goiânia, GO, Brasil.

Abstract - The emerald composition of the Campos Verdes mining district (Goiás state) was determined by the infrared spectroscopy with Fourier transform (FTIR) and inductive plasm spectrometry (ICP-MS). The results show that the emerald from this region is characterized by relatively high total iron proportions and weight loss ignition, combined with little amount of alkalis ($\text{Na}^+ \gg \text{Cs}^+ > \text{Li}^+$). The infrared spectrum is defined by type II- H_2O vibrations. The integration of chemical data with physical and optical properties makes possible to differentiate the Campos Verdes emerald from those Pakistani gems extracted in the mines of the Mingora, Gujarkili e Makhad, as well as from emeralds from Franqueira (Spain), Itabira (Brazil), Colombia, and from those produced in laboratories.

Key words: Beryl, emerald, FTIR, ICP-MS, mineral chemistry.

INTRODUÇÃO

Depósitos de esmeralda ocorrem em todos os continentes e sua exploração econômica se deve ao aproveitamento deste mineral como gema pela joalheria. No Estado de Goiás, destaca-se a região esmeraldífera dos municípios de Santa Teresinha de Goiás e de Campos Verdes, aqui denominada apenas de distrito mineiro de Campos Verdes, como um dos mais importantes produtores dessa gema no Brasil. Em 1980, o *Gemological Institute of America* (GIA) definiu o termo esmeralda como uma variedade de berilo ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) de tonalidade verde intensa, rica em cromo. A influência do cromo na cor da esmeralda é explicada pela *teoria dos campos de ligação* (Nassau, 1983) que envolve a excitação de elétrons nos orbitais 3d incompletos. Alguns estudos (por exemplo, Schwarz, 1987; Nassau, 1988) propõem que outros agentes corantes, quer associados com o cromo ou isolados, tal como o V^{3+} , podem conferir a tonalidade verde ao berilo. Portanto, para a classificação de um berilo como esmeralda necessita-se também de informações sobre sua composição química.

Apesar dos recentes avanços tecnológicos, ainda hoje a resolução da maioria dos métodos analíticos é limitada para fins mineralógicos e gemológicos, devido à dificuldade de se quantificar elementos, em nível de ppm, em amostras muito pequenas. Dentre as técnicas que analisam <0,5 grama de material pulverizado, destaca-se a espectroscopia de infravermelho

com transformação de Fourier (FTIR), que fornece informações sobre as substâncias voláteis que ocorrem nos minerais. Este método vêm se popularizando no estudo gemológico, pois pode ser empregado tanto em amostras pulverizadas como em gemas transparentes sem destruí-las. Outra técnica que começa a ser aplicada com êxito nos estudos gemológicos é a espectrometria de plasma, a qual possibilita a quantificação dos elementos cromóforos em nível de ppm. A desvantagem desta técnica reside no fato que as análises requerem aproximadamente 10 gramas de material, o que limita sua aplicação a cristais muito grandes ou a concentrado de grãos.

A determinação precisa da composição química da esmeralda, além de contribuir para sua classificação, pode fornecer informações sobre seu ambiente de cristalização. Os gemólogos utilizam estes dados combinados com o estudo de inclusões e outras feições internas para distinguir as gemas naturais dos produtos sintéticos e inclusive identificar sua proveniência.

O objetivo deste trabalho é contribuir para uma caracterização mineralógica mais aprofundada da esmeralda de Campos Verdes mediante a apresentação de novos dados químicos desta gema, os quais foram obtidos por ICP-MS e FTIR. A combinação destes resultados com as propriedades ópticas e físicas dos cristais possibilita o estabelecimento de critérios que diferenciam as gemas de Campos Verdes daquelas provenientes de outras localidades.

GEOLOGIA DO DISTRITO MINEIRO DE CAMPOS VERDES

O distrito mineiro de Campos Verdes aloja-se na Seqüência de Santa Teresinha, que forma um cinturão relativamente estreito, disposto segundo NNE-SSW. Este cinturão está situado a cerca de 400 km a noroeste de Brasília, inserido na porção centro-oeste do Maciço de Goiás. Detalhes do contexto geológico desta região foram descritos nos trabalhos de Biondi (1990), Costa (1986), Costa & Leão de Sá (1991) e D'el-Rey Silva & Giuliani (1988).

A Seqüência de Santa Teresinha é constituída por talco xistos, clorita-muscovita-quartzo xistos, magnetita-muscovita xistos e muscovita quartzitos (Fig. 1), os quais sobrepõem biotita gnaisses e anfibólio gnaisses. As rochas dessa região foram deformadas e metamorfasadas na fácies xistos verdes durante a Orogênese Brasileira (Barros Neto & D'el-Rey Silva, 1995). As gemas são extraídas dos talco xistos submetidos à carbonatação ou de veios de quartzo e carbonato.

A idade do evento mineralizante ainda é um ponto de controvérsia. Biondi & Poidevin (1995) propuseram uma idade Arqueana para a formação das esmeraldas baseados nos resultados radiométricos obtidos pelo método Pb-Pb em grãos de galena inclusos em carbonatos da zona mineralizada. Posteriormente, Ribeiro-Althoff *et al.* (1996) analisaram lamelas de flogopita pelos métodos K-Ar e ^{40}Ar - ^{39}Ar que forneceram uma idade em torno de 522 ± 1 Ma para o evento que formou as esmeraldas.

O arcabouço estrutural da região de Campos Verdes é modelado por uma estrutura sinformal. Zonas de cavalgamento seccionaram a unidade de talco xistos produzindo dobras em bainha de 1 a 10 m de amplitude e eixo disposto em torno de 15° a 350° . As rochas mineralizadas ocorrem no núcleo das dobras em bainha (D'el-Rey Silva & Giuliani, 1988; Barros Neto & D'el-Rey Silva, 1995) sugerindo que as zonas de cisalhamento canalizaram os fluidos mineralizantes (Giuliani *et al.*, 1990). A alteração hidrotermal, durante o cisalhamento, possibilitou a formação de halos de talcificação, carbonatação, biotitização, albitização

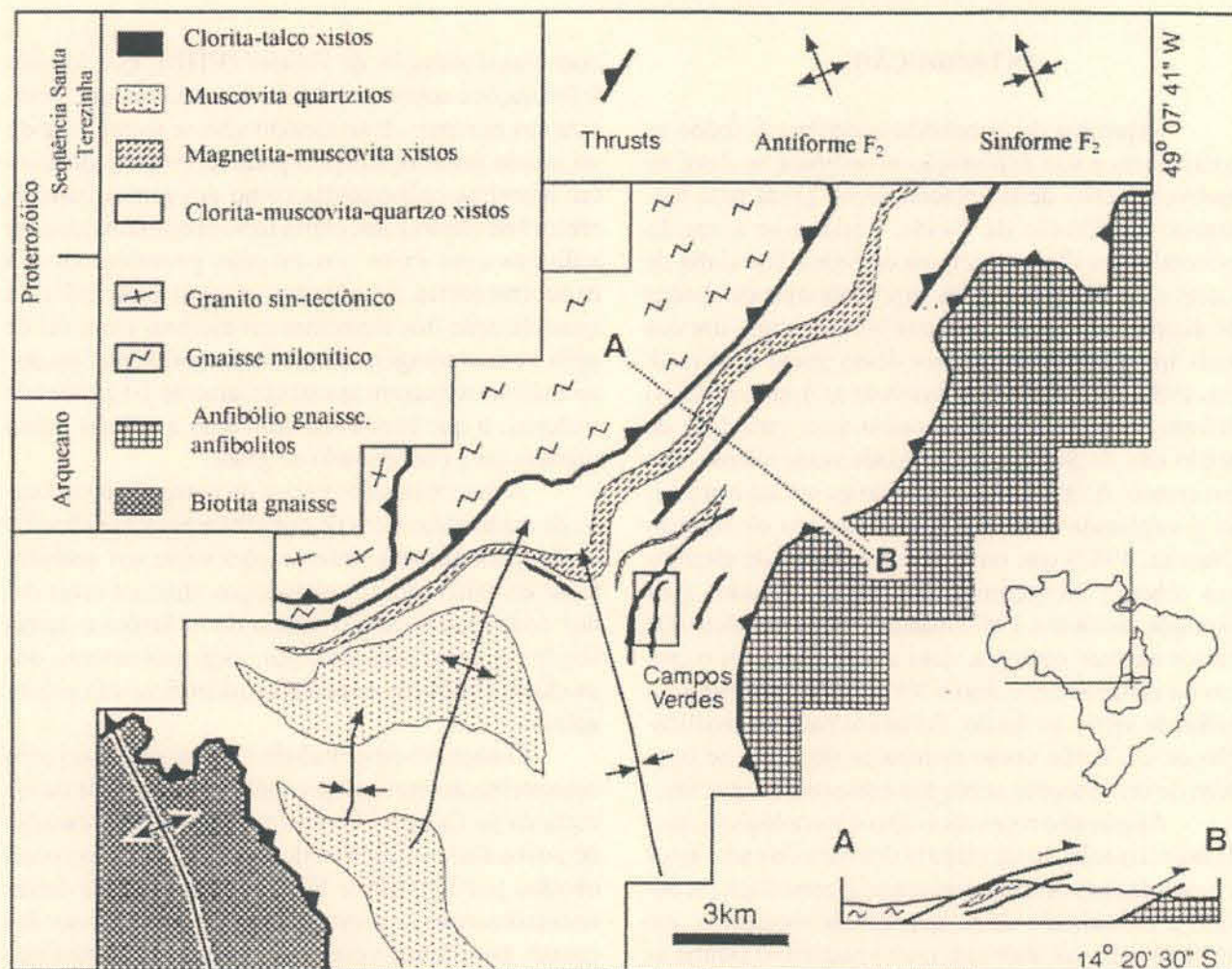


Figura 1 - Esboço geológico simplificado do distrito mineiro de Campos Verdes (modificado de Costa, 1986).

e sulfetação. As flutuações na pressão de fluidos durante a interação fluido/rocha propiciou a formação de fraturas e brechas hidráulicas em veios mineralizados. O detalhamento da alteração hidrotermal ultrapassa o objetivo deste estudo, por isso recomenda-se ao leitor que consulte a discussão sobre os efeitos da interação fluido/rocha na área de Campos Verdes apresentada por Biondi (1990).

A natureza aquosa e salina dos fluidos mineralizantes contendo proporções subordinadas de CO_2 e CH_4 foi demonstrada por Barros & Kinnaird (1987), via estudos microtermométricos em inclusões fluidas contidas nos cristais de esmeralda de Campos Verdes. Seus resultados indicaram que a precipitação destas gemas ocorreu em torno de 350 °C, sob uma pressão variável de 0,4-0,7 Kbars. Fallick & Barros (1987) mostraram que a H_2O contida nos canais estruturais da esmeralda de Campos Verdes apresenta δD igual a $-39\pm 5\%$, enquanto a estrutura cristalina deste mineral é caracterizada por $\delta\text{D} = -50\pm 10\%$ e $\delta^{18}\text{O} = 11\pm 1\%$ e suas inclusões fluidas por δD variando de -156 a -62% . Segundo Fallick & Barros (1987), estes resultados podem ser atribuídos tanto a uma fonte magmática como ao metamorfismo das rochas ultrabásicas.

PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

Vários cristais de esmeralda foram extraídos de uma mesma amostra e agrupados formando um concentrado. Após o exame sob lupa binocular, os cristais isentos de inclusões visíveis foram lavados com uma solução diluída de HCl a 130°C, por 90 min., a fim de remover o carbonato das fraturas e, em seguida, triturados em gral de ágata. No Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica (UFRGS), a pureza de cada concentrado foi monitorada por Difração de Raios X (DRX), empregando-se um difratômetro Siemens®, equipado com tubo de $\text{CoK}\alpha$. As análises foram executadas sob uma tensão de 30 KV e corrente de 30 mA, no intervalo de 2 a $80^\circ 2\theta$, com precisão de $0,026^\circ 2\theta$. O quartzo pulverizado foi utilizado como padrão interno.

Cerca de 7 a 8 gramas de cada concentrado de esmeralda foi analisado por ICP-MS no Actlab-Activation Laboratories Ltd (Canadá). A proporção de SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Cr_2O_3 , BeO , V_2O_5 , Cs_2O , Sc_2O_3 , Rb_2O e PF foi determinada por fusão, enquanto que o FeO foi medido por *titracion*. Os outros elementos (Ba, Sr, Y, Zr, Li, Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Cd and Bi) foram analisados por digestão total e o CO_2 em forno LECO.

As substâncias voláteis foram identificadas por espectroscopia de infravermelho com transformação de Fourier. Estas análises foram realizadas no Instituto de Química (UFRGS) utilizando um espectrofotômetro de FTIR (Mod. Galaxy® serie 3000), operando em temperatura ambiente, com uma precisão de 4 cm^{-1} por medida. As análises foram efetuadas em pastilhas do pó dos cristais de esmeralda e de KBr (1:100), conforme o procedimento descrito por Russel (1974).

As propriedades físicas e ópticas dos cristais de esmeralda foram determinadas no Laboratório de Gemologia (IG/UFRGS) utilizando dicrosscópico, polariscópico, refratômetro de contato Topcon®, microscópico gemológico de imersão Schneider® (Mod.DE-3), filtros de absorção (Chelsea e Göttinger) e lâmpada ultravioleta de ondas longas (3150-4000 Å). A densidade foi determinada pelo método hidrostático usando água destilada a temperatura ambiente e balança MARTE® (Mod.A200CT), com precisão de 0,001 g. Imagens de elétrons secundários e retroespalhados foram obtidas utilizando microscópico eletrônico de varredura na Escola de Engenharia (UFRGS), enquanto as de catodoluminescência foram obtidas usando microsonda eletrônica Cameca SX50 no CPGq (UFRGS).

PROPRIEDADES MINERALÓGICAS DA ESMERALDA

No distrito de Campos Verdes, o berilo de cor verde aparece em diversas tonalidades, mas apenas aqueles de tonalidade mais intensa são classificados como esmeralda e, portanto, aproveitados comercialmente. Pequenas quantidades de berilo azul e incolor também ocorrem no mesmo nível mineralizado.

A esmeralda aparece como cristais eudíricos a subédricos, combinando as formas do prisma hexagonal com o pinacóide basal. Este mineral apresenta hábito prismático alongado, podendo formar agrupamentos radiais, irregulares ou paralelos (Fig. 2). A densidade medida em 40 cristais oscilou entre 2,71 e $2,79\text{ g/cm}^3$, enquanto o dicroísmo variou de verde maçã a verde-azulado. Os índices de refração, determinados nas faces do prisma, forneceram valores para No entre 1,590 e 1,593 e para Ne entre 1,580 e 1,584 resultando na birrefringência entre 0,005 e 0,012 e caráter óptico uniaxial negativo. Todos os cristais analisados foram inertes à radiação ultravioleta de ondas longas e não alteraram a cor quando observados com o filtro de Chelsea; entretanto apresentaram cor castanho avermelhada escura sob o filtro de Göttinger.

Alguns cristais de esmeralda aqui estudados mostraram-se translúcidos, devido à presença de fra-

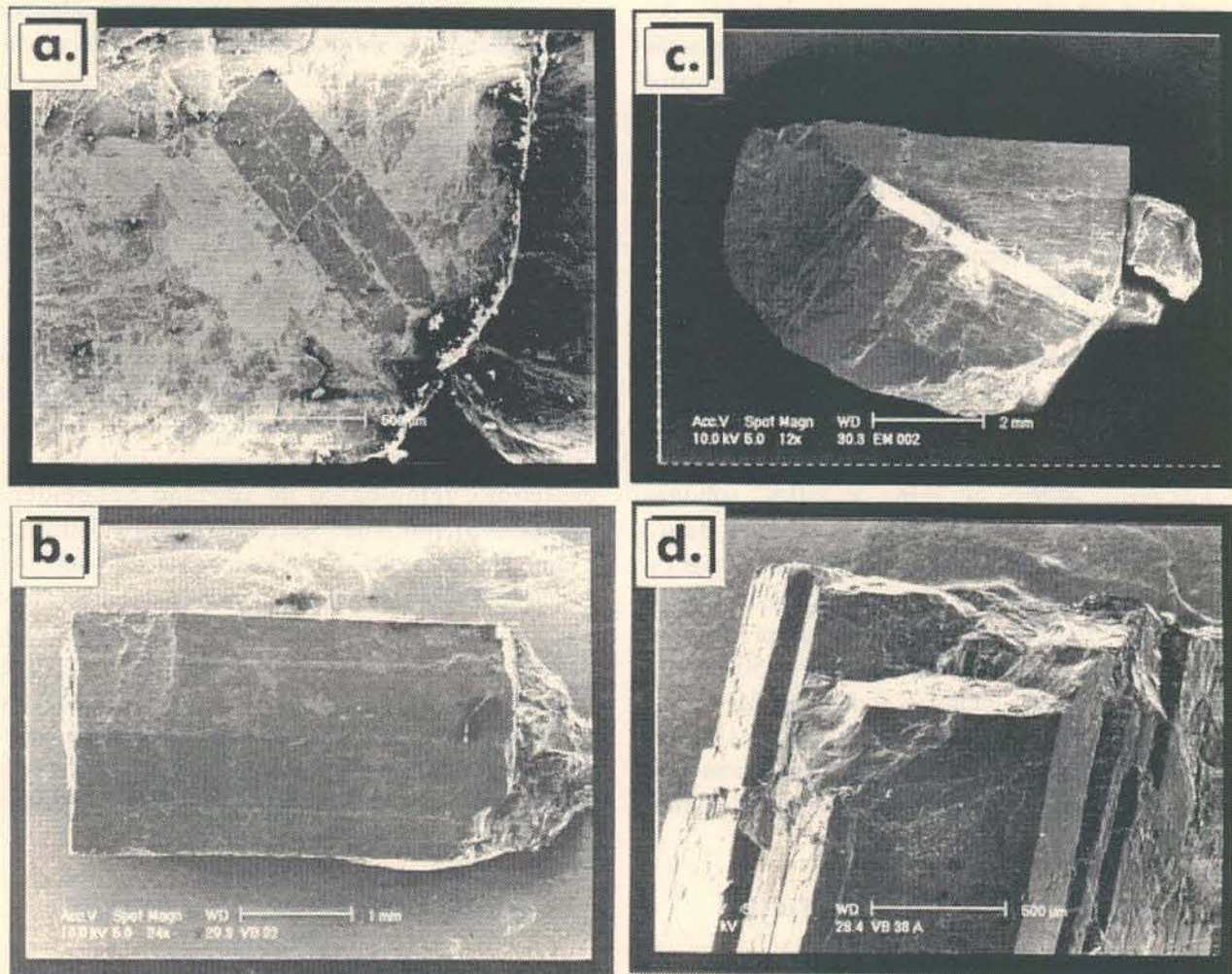


Figura 2 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura das gemas de Campos Verdes. (a) Fragmento de veio de quartzo e carbonato destacando um cristal de esmeralda fraturado. (b) Cristal prismático de esmeralda alongado segundo o eixo cristalográfico *c*. (c) Cristais de esmeralda mostrando fraturas perpendiculares ao eixo cristalográfico *c* preenchidas por uma massa de berilo verde. (d) Detalhe de um agrupamento paralelo de cristais de esmeralda seccionados por fraturas intragranulares.

turas e de inclusões sólidas e fluidas. Dentre as feições internas (Figs. 3 e 4), destacam-se as estrias e zonas de crescimento, as fraturas ora preenchidas por uma massa de berilo verde ou por carbonato e/ou filossilicatos e ora cicatrizadas formando estruturas do tipo *bandeira* (Fig. 4) comparáveis àquelas mostradas por Schwartz (1987). Com o emprego de DRX foi possível identificar inclusões de biotita/flogopita, talco, carbonato (dolomita e magnesita), pirita, picotita e quartzo. As inclusões minerais presentes nos cristais de Campos Verdes foram descritas minuciosamente em trabalhos anteriores (Bank & Petsch, 1982; Barros & Kinnaird, 1987; Borelli, 1986; Cassedane & Sauer, 1984; Giuliani & Weisbrod, 1988; Hänni & Kerez, 1983; Lind *et al.*, 1986; Mendes & Svisero, 1988; Schwarz, 1990). Em conjunto, nos estudos anteriores foram caracterizadas inclusões de anfibólio, berilo/esmeralda, rutilo, cromita, hematita, ilmenita, limonita/goetita, pentlandita, feldspato, apatita, granada e barita, além daquelas descritas neste trabalho.

Vários padrões de zonação de cor foram identificados nos cristais de esmeralda aqui estudados, dentre os quais o mais comum foi observado na seção basal destes minerais representado pelo centro incolor ou verde claro envolvido por zonas concêntricas em tons de verde mais intenso. Padrões inversos a este também foram observados em alguns cristais. Outro tipo de zonação corresponde a uma variação de cores segundo o eixo cristalográfico *c*, passando do verde intenso até o incolor.

QUÍMICA DA ESMERALDA

Os resultados de ICP-MS dos concentrados de esmeralda de Campos Verdes são apresentados na tabela 1. As análises mostram que a proporção de BeO é relativamente constante, enquanto a proporção de SiO₂ e de Al₂O₃ varia de uma amostra para outra. O coeficiente de correlação entre Al³⁺ e (Fe_T + Cr³⁺) é de -0,89, indicando relações de substituição entre estes

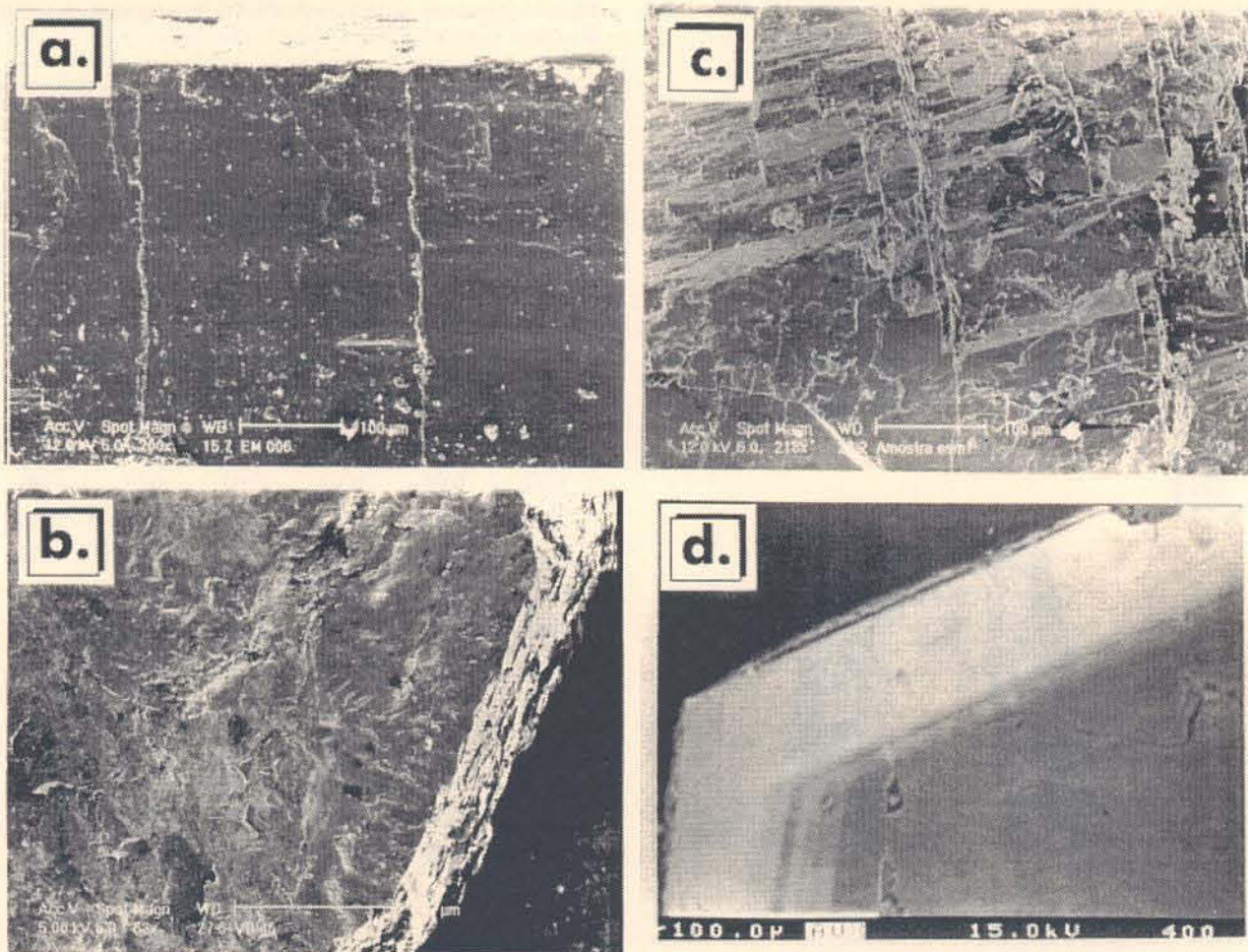


Figura 3 - Texturas dos cristais de esmeralda do distrito de Campos Verdes. (a) Imagem de elétrons secundários destacando fraturas perpendiculares ao eixo cristalográfico *c*. (b) Imagem de elétrons retroespalhados realçando uma borda de composição diferente. Observe a dispersão das inclusões sólidas no núcleo do cristal. (c) Imagem de elétrons secundários de um fragmento de esmeralda realçando as espirais de crescimento com contornos de crescimento retangulares similares àquelas apresentadas por Schwarz (1987) para a esmeralda sintética de Gilson. (d) Imagem de catodoluminescência destacando as zonas de crescimento paralelas ao eixo cristalográfico *c* do cristal de esmeralda.

elementos (Fig. 5). A proporção de MgO correlaciona-se com a de CO₂ (Tab. 1) sugerindo que as análises destes elementos podem ter sido contaminadas por inclusões de carbonato. Por isso, os dados de MgO e CO₂ não serão considerados nesta discussão.

Dentre os metais alcalinos, apenas quantidades de Na >> Cs > Li foram detectadas em proporções confiáveis pelo método ICP-MS. As concentrações dos demais álcalis, assim como dos elementos de raio iônico pequeno (Ba, Sr, Rb e Pb) e dos elementos com carga elevada (Zr, Y e Ti) situaram-se em quantidades próximas ou abaixo do limite de detecção. Apenas pequenas quantidades de elementos de transição (V, Cu, Ni, Zn e Sc) foram determinadas nos concentrados.

Em todas as análises determinou-se mais de 2 % em peso de perda ao fogo. A identificação dos voláteis que compõem a perda ao fogo foi obtida via FTIR, que registrou bandas em 3655-3658, 3591-3592 e 1625-1627 cm⁻¹ (Fig. 6). Segundo a classificação de

Wood & Nassau (1968) mostrada na tabela 2, as vibrações da água na esmeralda de Campos Verdes correspondem ao tipo II, cuja ocorrência está relacionada com a presença de álcalis nos canais estruturais do mineral (Hawthorne & Cerný, 1977). Outra substância volátil identificada nos canais estruturais da esmeralda foi o CO₂, pelo pico 2353 cm⁻¹ (Fig. 6). Comparando os espectros percebe-se que a intensidade dos picos da água predominam sobre as do CO₂, indicando a seguinte relação volumétrica: H₂O >> CO₂.

DISCUSSÃO

Os tipos de alteração hidrotermal, estruturas mineralizadas e composição das rochas encaixantes do distrito esmeraldífero de Campos Verdes assemelham-se àqueles observados nas minas Mingora, Gujarkili e Makhad no Vale Swat (Paquistão) como sintetizado na tabela 3. Snee *et al.* (1989) apresentaram dados composicionais das gemas do Vale Swat,

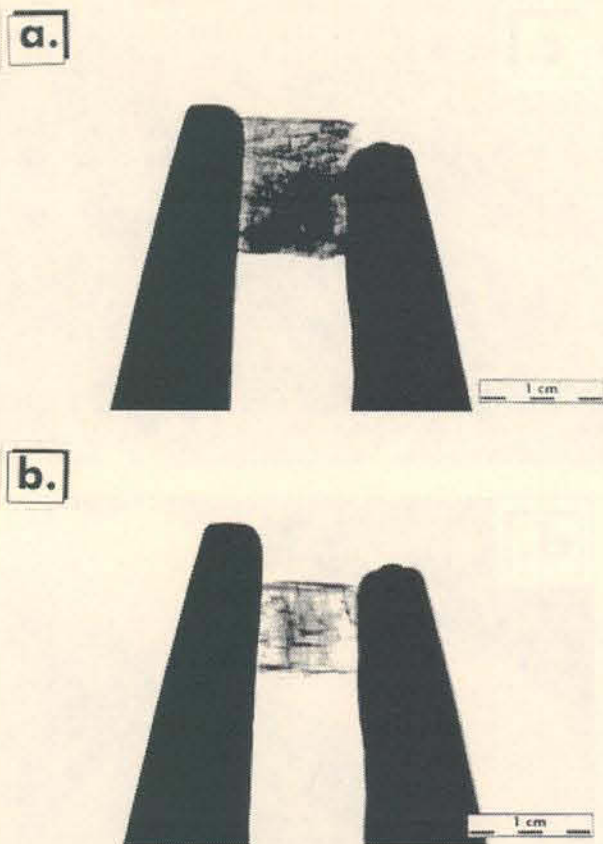


Figura 4 - Imagens dos cristais de esmeralda de Campos Verdes sob o microscópio gemológico de imersão destacando suas feições internas. (a) Fraturas cicatrizadas e agrupamentos de inclusões fluidas obscurecendo a transparência do cristal. (b) Estruturas em *bandeira* perpendiculares ao eixo cristalográfico *c*.

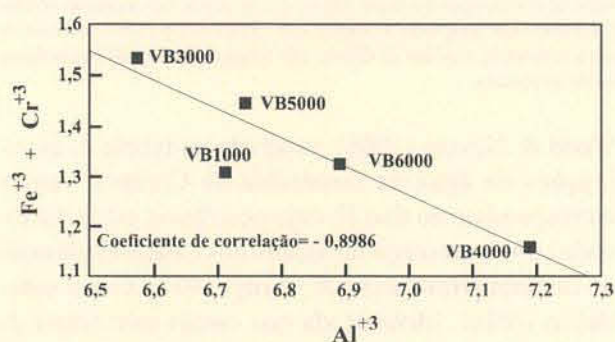


Figura 5 - Diagrama Al versus (Fe³⁺+Cr³⁺) das esmeraldas do distrito mineiro de Campos Verdes.

os quais foram obtidos via ICP. Até o momento, estes dados constituem o único registro de análises por ICP de cristais de esmeralda extraídos de rochas ultrabásicas, incluindo os mesmos elementos aqui determinados nas gemas de Campos Verdes. Por isso, a composição da esmeralda de Campos Verdes e daquelas extraídas em Mingora, Gujarkili e Makhad foram comparadas. A tabela 4 mostra que a esmeralda de Campos Verdes apresenta um leve enriquecimento em ferro total e empobrecimento em Ba, Li, Cr e Ni e até mesmo na quantidade (Cr+Ni+V+Sc) se comparada

Tabela 1 - Resultados das análises de ICP-MS do concentrado de cristais de esmeralda provenientes de Campos Verdes, Goiás.

	VB1000	VB3000	VB4000	VB5000	VB6000
%					
SiO ₂	59,22	63,42	63,82	60,44	63,50
Al ₂ O ₃	12,68	12,42	13,58	12,74	13,02
Fe ₂ O ₃	1,52	1,77	1,21	1,67	1,54
FeO	0,62	0,25	0,26	0,25	<0,1
MnO	0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
MgO	6,26	4,52	3,56	5,06	4,10
CaO	1,10	0,24	<0,02	1,38	0,18
Na ₂ O	2,32	2,36	2,34	2,32	2,36
K ₂ O	0,06	0,10	0,06	0,04	0,08
TiO ₂	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
P ₂ O ₅	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,06
Cr ₂ O ₃	0,36	0,44	0,46	0,44	0,36
BeO	10,95	10,66	11,14	10,78	10,78
V ₂ O ₅	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06
Cs ₂ O	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Sc ₂ O ₃	0,20	0,22	0,18	0,20	0,18
Rb ₂ O	<0,01	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
LOI	4,52	3,32	2,92	4,62	3,18
CO ₂	2,27	0,54	0,08	2,24	0,34
ppm					
Ba	1	<2	<2	<2	<2
Sr	32	10	<2	38	6
Y	<1	<2	<2	<2	<2
Zr	<1	4	<2	4	<2
Li	30	24	38	28	28
Cu	2	2	5	3	2
Pb	<5	<5	<5	<5	<5
Zn	7	4	8	7	2
Ag	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Ni	97	44	40	44	37
Cd	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Bi	<5	<5	<5	<5	<5

com aquelas do Vale Swat. Em termos de concentração de Be, Al, Sr, Zn, Sc e V estas gemas são similares.

A esmeralda de Campos Verdes e aquelas do Vale Swat apresentam algumas propriedades físicas e ópticas semelhantes, como por exemplo a densidade e os índices de refração (Tab. 3). Gübelin (1989) afirmou que as gemas paquistanesas são caracterizadas pela presença de abundantes inclusões fluidas e mais de um tipo de inclusão mineral num mesmo cristal (Tab. 3). Dentre as inclusões sólidas identificadas por Gübelin (1989) destacam-se as lamelas de fuchsite e grãos de gersdofita e pirrotita que possibilitam dife-

Tabela 2 - Principais bandas vibracionais no espectro de infravermelho, expressas em cm^{-1} , mostrada pelos voláteis nas esmeraldas de Campos Verdes (este estudo), Franqueira (Marcos-Pascual & Moreiras, 1997), Itabira (Souza, 1990) e nas gemas sintéticas (Flanigen *et al.*, 1967), segundo a classificação de Wood & Nassau (1968).

	Wood & Nassau (1968)	Campos Verdes (Goiás)	Franqueira (Espanha)	Itabira (Minas Gerais)	Esmeralda Sintética
H ₂ O tipo I	1595 3555 3694	- - -	1580 - 3696	- - 3691	- - 3699
H ₂ O tipo II	1628 3592 3655	1625-1627 3591-3592 3655-3658	1634 3594 3659	1628 3589 3649	- - -
CO ₂	2361	2353	-	2375	-
CH ₄	-	-	-	2914	-

reenciar as gemas paquistanesas daquelas de Campos Verdes, uma vez que até agora estas inclusões não foram identificadas nos cristais de Campos Verdes. Inclusões de talco, flogopita e de óxidos de Fe ainda não foram descritas nas esmeraldas paquistanesas, entretanto sua ocorrência em algumas gemas é possível uma vez que a rocha mineralizada é ultrabásica. Outra feição distintiva refere-se à proporção de inclusões fluidas, que segundo Schwarz (1987) é relativamente pequena na esmeralda de Campos Verdes.

Em relação a outras ocorrências de esmeralda em xistos ultrabásicos, aquelas de Campos Verdes podem ser distinguidas pela combinação do espectro de infravermelho com os tipos de inclusões. Na faixa de 3000 a 4000 cm^{-1} , a esmeralda de Campos Verdes apresenta apenas os picos da água do tipo II, enquanto as gemas descritas por Marcos-Pascual & Moreiras (1997) na região de Franqueira (Espanha) e aquelas descritas por Souza (1990) na área de Itabira (Minas Gerais) mostram tanto vibrações da água do tipo I

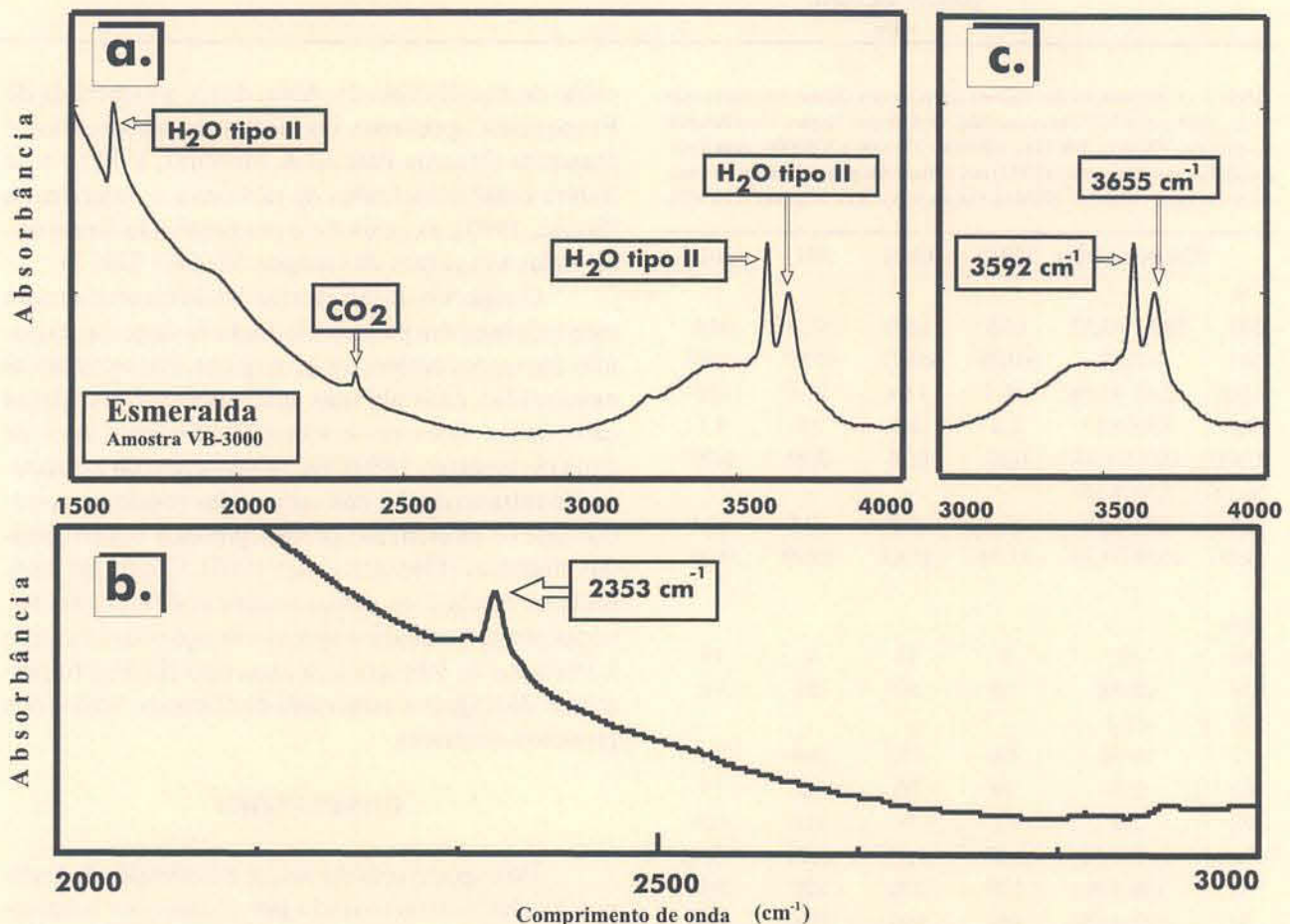


Figura 6 - Espectro de FTIR da amostra VB-3000 do concentrado de esmeraldas de Campos Verdes. (a) Identificação das vibrações produzidas pelo estiramento das moléculas de H₂O e CO₂. (b) Detalhe do item (a) mostrando os valores das vibrações da molécula de CO₂. (c) Detalhe do item (a) apresentando os valores das vibrações da molécula de H₂O no intervalo de 3000 a 4000 cm^{-1} .

Tabela 3 - Comparação entre a geologia e as propriedades da esmeralda de Campos Verdes com a das gemas do Vale do Swat (Gübelin, 1989; Snee *et al.*, 1989), Franqueira (Marcos-Pascual & Moreiras, 1997) e Itabira (Hänni *et al.*, 1987; Souza, 1990).

	Campos Verdes (Goiás)	Vale do Swat (Paquistão)	Franqueira (Espanha)	Itabira (Minas Gerais)
Rocha mineralizada	Talco xistos Biotititos	Talco-carbonato xistos Talco-clorita-dolomita xistos	Flogopíto	Biotíto Clorita xisto Pegmatito caulnizado
Estrutura mineralizada	Planos de cisalhamento Dobras em bainha Veios de quartzo e carbonato	Planos de cisalhamento Fraturas, <i>tension gashes</i> Veios de quartzo <i>Stockwork</i>		Dobras recumbentes Falhas
Alteração hidrotermal	Carbonatação Talcificação Biotitização	Carbonatação Talcificação Cloritização		Talcificação Cloritização Biotitização
Índices de refração	No= 1,590-1,593 Ne= 1,580-1,584 $\Delta n= 0,005-0,012$	No= 1,586-1,600 Ne= 1,579-1,593 $\Delta n= 0,007-0,009$	No= 1,581-1,582 Ne= 1,575-1,576 $\Delta n= 0,006-0,007$	No= 1,584-1,588 Ne= 1,579-1,584 $\Delta n= 0,004-0,006$
Densidade g/cm ³	2,71- 2,79	2,69-2,78	2,69-2,71	2,77
Inclusões minerais	Biotita/flogopita, rutilo, dolomita magnesita, pirita picotita, quartzo, anfíbólio, berilo, ilmenita, cromita, hematita, apatita, limonita, goetita, pentlandita, barita, granada, feldspato, talco	Actinolita, cromita, dolomita, feldspato, gerdorfitita, fuchista, magnesita, pirrotita, micas, pentlandita	Flogopita, pirita alexandrita, berilo, fenaquita, ilmenita, quartzo, antofilita	Biotita/flogopita, quartzo, tremolita, ralstonita, apatita, cromita, hematita, dolomita, andesina, molibdenita

Tabela 4 - Comparação dos valores de mínimo-máximo dos dados químicos obtidos por ICP das esmeraldas de Campos Verdes, considerando as amostras VB1000, VB3000, VB4000, VB5000 e VB6000, com aqueles obtidos por Snee *et al.* (1989) em esmeraldas paquistanesas provenientes das minas Makhad (SEM5), Gujarkili (GK21), Migora (M1 e M2).

	Campos Verdes	SEM5	Gk21	M1	M2
%					
SiO ₂	59,22-63,82	64,8	65,0	67,0	64,6
TiO ₂	<0,02	<0,05	<0,07	<0,07	<0,05
Al ₂ O ₃	12,42-13,58	14,4	13,4	13,4	12,5
MgO	3,56-6,25	2,8	3,0	3,6	4,1
CaO	<0,02-1,38	0,27	0,36	0,29	0,20
Na ₂ O	2,32-2,36	-	-	-	-
K ₂ O	0,04-0,10	<0,4	<0,5	<0,5	<0,4
BeO	10,66-11,14	11,54	11,63	10,49	9,49
ppm					
Ba	<2	9	14	9	10
Sr	<2-38	10	30	20	10
Zr	<1-4	-	-	-	-
Li	24-38	200	170	200	140
Cu	2-5	10	20	<7	13
Zn	2-8	<7	9	<10	<10
Fe*	1,00-1,36	0,37	1,13	0,98	1,28
V	336-448	590	170	220	240
Sc	1170-1430	950	990	1100	1600
Cr	2460-3140	3900	11000	5100	8000
Ni	37-97	130	190	110	210

como do tipo II (Tab. 2). Além disso, a esmeralda de Franqueira apresenta inclusões de alexandrita e fenaquita (Marcos-Pascual & Moreiras, 1997) e a de Itabira contém inclusões de ralstonita e molibdenita (Souza, 1990), as quais até o momento não foram observadas nas gemas de Campos Verdes (Tab. 3).

O espectro de infravermelho da esmeralda aqui estudada também permite distingui-la daquelas extraídas em outros ambientes geológicos. Por exemplo as esmeraldas colombianas que ocorrem em xistos carbonosos apresentam vibrações dos dois tipos de água (Schmetzer, 1989). Outra vantagem da assinatura de infravermelho das esmeraldas reside na possibilidade de diferenciá-la com segurança das esmeraldas sintéticas (Flanigen *et al.*, 1967). Conforme mostrado na tabela 2, as gemas sintéticas diferem das naturais por apresentarem apenas vibrações da água tipo I. Portanto, as vibrações da água tipo II (Fig. 6) permitem distinguir a esmeralda de Campos Verdes dos produtos sintéticos.

CONCLUSÕES

Do exposto conclui-se que a esmeralda de Campos Verdes é caracterizada por proporções relativamente elevadas de ferro total e de perda ao fogo, combinada com pequenas quantidades de álcalis (Na⁺ >>

Cs⁺ > Li⁺). A água do tipo II é a principal substância que compõe a perda ao fogo.

Essas características constituem critérios químicos que permitem diferenciá-la das gemas paquistanesas provenientes do Vale Swat, assim como das esmeraldas de Franqueira, Itabira, Colômbia e das produzidas em laboratório. Por outro lado, a similaridade entre os tipos de inclusões minerais das gemas de Campos Verdes com aquelas de outras minas alojadas em xistos ultrabásicos dificultam sua discriminação apenas pelas espécies de inclusões sólidas. Critérios seguros para diferenciar os cristais de esmeralda de Campos Verdes daqueles provenientes de outras localidades e das gemas sintéticas podem ser obtidos pela integração dos dados de ICP-MS com a assinatura desta gema no espectro de FTIR.

Agradecimentos - Os autores agradecem à Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira- ADIMB, em especial ao Prof. Dr. Onildo J. Marini, pelo apoio à pesquisa. Estendem sua gratidão a Mineração Peneri pelo acesso e auxílio logístico durante os trabalhos de campo. Esta pesquisa foi financiada pelo projeto PADCT/FINEP-DNPM nº 65.94.0158.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bank, H. & Petsch, E. 1982. Über ein neues Vorkommen von smaragd bei Santa Teresinha, Goyaz, Brasilien. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischeschen Gesellschaft*, **31** (1/2): 89-90.
- Barros, J.G.C. & Kinnaird, J. 1987. Inclusões fluidas em esmeraldas e berilos verdes do Estado de Goiás. In: Reunião da SBPC, 32., 1987, Brasília, *Anais ...* Brasília, SBG. g.5, f.3, p.643.
- Barros Neto, L.S. & Del-Rey Silva, L.J.H. 1995. Evolução estrutural do distrito esmeraldífero de Campos Verdes, Goiás. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 5., 1995, Gramado, *Anais ...* Gramado, SBG/CPGq.v.1, p.337-339.
- Biondi, J.C. 1990. Depósitos de esmeralda de Santa Teresinha (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, **20**: 7-24.
- Biondi, J.C. & Poidevin, J.L. 1995. Idade da mineralização e da Sequência Santa Teresinha (Goiás-Br). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1995, Camboriú, *Anais ...* Camboriú, SBG/DNPM/CPRM. v.1, p.302-304.
- Borelli, A. 1986. Osservazioni sulle inclusioni solide degli smeraldi di Santa Teresinha de Goiás (Brasile). *La Gemmologia*, **XI** (3): 6-10.
- Cassedane, J.P. & Sauer, D.A. 1984. The Santa Teresinha de Goiás emerald deposit. *Gems & Gemology*, **20**: 9-14.
- Costa, S.A.G. 1986. Correlação da sequência encaixante das esmeraldas de Santa Teresinha de Goiás com os terrenos do tipo *greenstone belt* de Crixás e tipologia dos depósitos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, *Anais...*, SBG. v. 2, p.597-614.
- Costa, S.A.G. & Leão de Sá, W. 1991. Garimpos de esmeralda de Santa Teresinha de Goiás, Goiás. In: Schobenhau, C.; Queiroz, E.T. & Coelho, C.E.S. (eds). *Principais Depósitos Minerais do Brasil-Gemas e Pedras ornamentais*. p.245-258. (Principais Depósitos Minerais do Brasil, n.IV)
- D'el-Rey Silva, L.J.H. & Giuliani, G. 1988. Controle estrutural da jazida de esmeraldas de Santa Teresinha de Goiás: Implicações na gênese, tectônica regional e no planejamento da lavra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1988, Belém, *Anais...*, Belém, SBG. v.1, p.413-247.
- Fallick, A.E. & Barros, J.G. 1987. A stable-isotope investigation into the origin of beryl and emerald from the Porangatu deposits, Goiás state, Brazil. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, **66**: 293-300.
- Flanigen, E.M.; Breck, D.W.; Mumbach, N.R. & Taylor, A.M. 1967. Characteristics of synthetic emeralds. *American Mineralogist*, **52**: 744-772.
- Giuliani G., Silva L.J.H.D. & Couto P. 1990. Origin of emerald deposits of Brazil. *Mineralium Deposita*, **25**: 57-64.
- Giuliani, G. & Weisbrod, A. 1988. SEM and its application. Determination of solid and daughter minerals in fluid inclusions from some Brazilian emerald deposits. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA, 1988, Belém, *Anais...*, Belém. SBG. v.1, p. 445-457.
- Gübelin, E.J. 1989. Gemological characteristics of Pakistani emeralds. In: Kazmi, A.H. & Snee, L.W. (eds). *Emeralds of Pakistan- Geology, gemology & genesis*. New York, Van Nostrand Reinhold Co., p. 75-91.
- Hänni, H.A.; Schwartz, D.; Fischer, M. 1987. The emeralds of the Belmont Mine. Minas Gerais, Brazil. *Journal of Gemmology*, **20**: 446-456.
- Hänni, H.A. & Kerez, C.J. 1983. Neues vom smaragd vorkommen von Santa Teresinha de Goiás, Brasilien. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischeschen Gesellschaft*, **32**(1): 50-58.
- Hawthorne, F.C. & Cerný, P. 1977. The alkali-metal positions in Cs-Li beryl. *Canadian Mineralogist*, **15**: 414-421.
- Lind, T.; Henn, U. & Bank, H. 1986. Smaragdeg von Sta. Teresinha de Goiás, Brasilien, mit relativ hoher Lichtbrechung. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischeschen Gesellschaft*, **35**: 186-187.
- Marcos-Pascual, C. & Moreiras, D.B. 1997. Characterization of alexandrite, emerald and phenakite from Franquera (NW Spain). *Journal Gemmology*, **25**(5): 340-357.
- Mendes, J.C. & Svisero, D.P. 1988. As inclusões cristalinas e fluidas da esmeralda de Santa Teresinha de Goiás e seu significado geológico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988, Belém, *Anais...*, Belém, SBG. v.1, p.445-450.
- Nassau, K. 1983. *The physics and chemistry of color- The fifteen causes of color*. New York, John & Wiley Sons, 454p.
- Nassau, K. 1988. The 13 colors of gems and minerals. *Lapidary Journal*, **41**: 32-39, 64-73.
- Ribeiro-Althoff, A.M.; Cheilletz, A.; Giuliani, G.; Féraud, G.; Zimmermann, J.L.; Barbosa Camacho, G. & Robert, P. 1996. Datações K-Ar e ⁴⁰Ar/³⁹Ar de mineralizações de esmeralda do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34, Salvador, *Anais...*, Salvador, SBG. v.7, p.324-328.
- Russel, J.D. 1974. Instrumentation and techniques. The infrared spectra of minerals. *Mineralogical Society Monograph*, **4**: 11-25.
- Schmetzer, K. 1989. Types of water in natural and synthetic emerald. *Neus Jb. Miner. Mh.*, **1**: 15-26.
- Schwarz, D. 1987. *Esmeraldas - Inclusões em gemas*. Ouro Preto. Imprensa Universitária, Univ. Fed. Ouro Preto. 439p.
- Schwarz, D. 1990. Die brasilianischen smaragde und ihre vorkommen: Santa Teresinha de Goiás/ GO. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischeschen Gesellschaft*, **39** (1), s.13-44.
- Snee, L.W.; Foord, E.E.; Hill, B. & Carter, S. 1989. Regional chemical differences among emeralds and host rocks of Pakistan and Afghanistan: implications for the origin of emerald. In: Kazmi, A.H. & Snee, L.W. (eds). *Emeralds of Pakistan- Geology, gemology & genesis*. New York, Van Nostrand Reinhold Co. p. 93-123.
- Souza, J.L. 1990. Mineralogia e geologia da esmeralda da jazida de Itabira, MG. *Revista Escola de Minas* **43**(2): 31-40.
- Wood L.L. & Nassau K. 1968. The characterization of beryl and emerald by visible and infrared absorption spectroscopy. *American Mineralogist*, **53**: 777-800.