

# Composição Química e Origem de Minerais Inclusos em Diamantes Brasileiros: Granadas \*

DARCY P. SVISERO

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

(Com 5 figuras no texto)

## INTRODUÇÃO

Uma série de trabalhos, desenvolvida nos últimos anos mostrou que a granada é uma das inclusões mais comuns em diamantes naturais. Outras fases, igualmente associadas ao diamante são: olivina, enstatita, diopsídio, onfacita, pirrotita, rutilo, ilmenita, zircão, cromioespinélio e o próprio diamante (Svisero, 1978; Meyer e Tsai, 1976; Sobolev, 1974).

A presença de granadas, inclusas em diamantes, foi estabelecida com segurança, pela primeira vez, por Futergendler (1956). Pouco depois, Futergendler *et al.* (1961) e Harris *et al.* (1967) descreveram diversos casos de epitaxia entre a granada e os respectivos diamantes hospedeiros. Informações referentes à composição química dessas granadas foram divulgadas, inicialmente, por Meyer (1967, 1968), e ampliadas, depois, por Meyer e Boyd (1969, 1972), Sobolev *et al.* (1969, 1970, 1972), Meyer e Svisero (1973, 1975), Gurney *et al.* (1979) e Hsiao-Ming *et al.* (1979).

Estudos semelhantes, efetuados no Brasil, mostraram que nossos diamantes, da mesma forma que os diamantes africanos, siberianos e de outros locais geográficos, contêm inclusões de granada, em grande abundância (Svisero, 1971; 1975; 1978). Além disso, existem similaridades notáveis entre as inclusões dos vários locais mencionados, no que diz respeito à mineralogia e à química dessas granadas. Essas semelhanças têm implicações com os

processos genéticos de formação do diamante na natureza, e, em última instância, com a composição das partes superiores do Manto de onde provêm os kimberlitos.

## MATERIAL E TÉCNICAS DE ESTUDO

As granadas estudadas foram retiradas do interior de diamantes coletados nas principais zonas de garimpagem do Brasil, incluindo os estados de Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás, Bahia e Paraná (Tabela I).

TABELA I

Locais de Amostragem dos Diamantes Contendo as Inclusões de Granadas

|         |                  |                                          |
|---------|------------------|------------------------------------------|
| DPS-40b | Cromiopiropo     | Rio Parnaíba<br>Coromandel, MG           |
| DPS-8a  | Cromiopiropo     | Rio Verde,<br>Mineiros, GO               |
| DPS-15a | Cromiopiropo     | Rio Garças,<br>Barra dos Garças, MT      |
| DPS-21a | Cromiopiropo     | Mina de Romaria,<br>Romaria, MG          |
| DPS-31a | Cromiopiropo     | Rio Tibagi,<br>Tibagi, PR                |
| DPS-42b | Cromiopiropo     | Rio Sapucaí-Mirim,<br>Franca, SP         |
| DPS-43a | Cromiopiropo     | Rio Paraguaçu,<br>Lençóis, BA            |
| DPS-47a | Piropo-almândina | Rio Paraguaçu,<br>Lençóis, BA            |
| DPS-22a | Piropo-almândina | Rio Cuiabá, Chapada<br>dos Guimarães, MT |
| DPS-25a | Piropo-almândina | Rio Abaeté,<br>Tiroso, MG                |
| DPS-57a | Piropo-almândina | Rio Parnaíba,<br>Itumbiara, GO           |

\* Recebido em 3 de junho de 1980; credenciado por UMBERTO G. CORDANI.

Inicialmente, os diamantes contendo as inclusões foram submetidos a tratamentos químicos com  $H_2SO_4$  e HF concentrados, para remover as impurezas aderentes nos interstícios do relevo, e posteriormente, fragmentados, em um dispositivo especial, para liberar as inclusões. Uma vez liberadas, as fases inclusas foram identificadas por análises químicas qualitativas, por meio de raios X dispersivos, utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura *Jeol II*. A composição química quantitativa foi obtida em uma microsonda eletrônica automática *MAC-500* existente no Departamento de Geociências da Universidade de Purdue, Estados Unidos da América. Outros pormenores, referentes à preparação das amostras e ao processamento dos resultados analíticos, podem ser encontrados em Svisero (1978).

As inclusões de granada identificadas nos diamantes brasileiros são idiomorfas, apresentando-se sob a forma de cristais equidimensionais constituídos pela combinação entre

octaedro, rombododecaedro e icositetraedro. O hábito predominante é o globular, ilustrado pela fotomicrografia (Fig. 1) e micrografia eletrônica (Fig. 2). Além das dimensões reduzidas das inclusões, que em geral se situam no intervalo 0,01 a 1 mm, as faces dos cristais apresentam-se abauladas, tornando praticamente impossível qualquer medida goniométrica. Outro aspecto característico das inclusões é a cor, registrando-se dois grupos distintos: um de coloração vermelha, vinho ou lilás, predominando sobre um segundo grupo de coloração variável, entre laranja a mel. O idiomorfismo dos cristais e a cor constante dessas granadas são suficientes para distingui-las das demais inclusões do diamante.

Quando examinadas sob nicois cruzados, as inclusões de granada apresentam-se circundadas por uma auréola de birrefringência anômala. Harris *et al.* (1970) mostraram que esse efeito é devido à expansão térmica da granada, cujo coeficiente de dilatação é bem diferente do do diamante. Eventualmente, os



Fig. 1 - Inclusões idiomorfas situadas em níveis diferentes no interior do diamante hospedeiro, cujas faces e arestas abauladas estão bem evidentes no lado esquerdo da fotomicrografia. Observa-se, em primeiro plano, uma granada de hábito icositetraédrico; em segundo plano, dois cristais prismáticos de olivina ligeiramente desfocalizados. Aumento 30  $\times$ .



Fig. 2 - Micrografia Eletrônica. Cristal equidimensional de cromiopiro removido do interior do diamante mediante fragmentação. O abaulamento das faces e das arestas, bem como as cavidades do lado superior direito, são feições produzidas, provavelmente, por dissolução durante a cristalização das inclusões. As fraturas concentradas no lado esquerdo inferior produziram-se durante a fragmentação do hospedeiro. Aumento 250  $\times$ .

esforços provocados pela inclusão desenvolvem fraturas radiais acompanhadas, ou não, de zonas de grafitização.

#### COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As composições químicas de onze granadas, extraídas de diamantes brasileiros, estão apresentadas na Tabela II. Elas abrangem amostras provenientes de garimpos diversos (Tabela I), e incluem sete cromiopiros e quatro piro-po-almandinas. Em todas as análises, os teores de FeO e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram calculados a partir do valor total do ferro fornecido pela microsonda eletrônica, de modo a satisfazer a fórmula geral das granadas  $X_3^{2+}Y_2^{3+}(SiO_4)_3$ . A letra X representa as posições de equilíbrio dos cátions de coordenação cúbica (número de coordenação 8) que podem ser ocupadas pelo magnésio, cálcio, ferro II e manganês. As posições Y, por sua

vez, são ocupadas pelos cátions de coordenação octaédrica (número de coordenação 6) representados pelo alumínio, ferro III, crômio e titânio. Embora a maior parte do alumínio apresente número de coordenação seis, alguns átomos desse elemento participam de coordenações tetraédricas e, nesse caso, substituem átomos de silício na rede cristalina.

A variação dos elementos principais está representada em dois tipos de diagramas de variação ternária: um relativo aos elementos químicos alumínio, crômio e ferro III (número de coordenação 6), e outro para os elementos magnésio, cálcio e ferro II (número de coordenação 8). Nas figuras 3 e 4, onze amostras estudadas estão comparadas com granadas de diamantes da União Soviética (Sobolev *et al.*, 1969, 1970, 1971, 1971a, 1972a; Sobolev, 1974), de vários países da África (Meyer e Boyd, 1972; Prinz *et al.*, 1975; Meyer e Tsai, 1976) e da Venezuela (Svisero e Gomes, 1977).

TABELA II  
Composição Química de Inclusões de Granada Presentes em Diamantes do Brasil

|                                                                       | ops-40b | ops-8a | ops-15a* | ops-21a** | ops-31a | ops-42b | ops-43a*** | ops-47a | ops-47b | ops-25a | ops-57a |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|--------|----------|-----------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|---------|
| SiO <sub>2</sub>                                                      | 41,17   | 41,48  | 41,11    | 41,21     | 40,35   | 41,02   | 40,87      | 40,59   | 39,97   | 40,55   | 39,92   |
| TiO <sub>2</sub>                                                      | <0,01   | <0,01  | <0,01    | <0,01     | <0,01   | 0,08    | <0,01      | 0,55    | 0,69    | 0,86    | 0,85    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                        | 14,26   | 16,71  | 15,56    | 15,20     | 10,45   | 16,10   | 16,23      | 20,85   | 20,88   | 20,07   | 20,31   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                        | 12,90   | 9,42   | 10,26    | 10,89     | 17,33   | 9,47    | 9,34       | 0,14    | 0,11    | 0,20    | 0,09    |
| FeO                                                                   | 6,43    | 6,07   | 6,23     | 6,30      | 5,84    | 5,62    | 6,51       | 18,09   | 18,32   | 15,99   | 17,00   |
| MgO                                                                   | 21,55   | 23,41  | 23,45    | 23,02     | 24,56   | 23,11   | 21,51      | 12,00   | 11,62   | 13,07   | 12,68   |
| CaO                                                                   | 3,30    | 2,30   | 2,48     | 2,43      | 0,93    | 3,81    | 5,09       | 6,70    | 8,45    | 8,39    | 8,32    |
| MnO                                                                   | 0,52    | 0,33   | 0,33     | 0,35      | —       | 0,63    | 0,25       | 0,50    | 0,56    | 0,34    | 0,50    |
| Total                                                                 | 100,12  | 99,72  | 99,41    | 99,41     | 99,44   | 99,84   | 99,81      | 99,42   | 100,51  | 99,47   | 99,67   |
| Número de cátions ( $\times 1000$ ) com base em 12 átomos de oxigênio |         |        |          |           |         |         |            |         |         |         |         |
| Si                                                                    | 3005    | 2990   | 2989     | 3001      | 2984    | 2971    | 2977       | 3051    | 2997    | 3037    | 3001    |
| Al <sup>iv</sup>                                                      | —       | 10     | 11       | —         | 16      | 29      | 23         | —       | 3       | —       | —       |
| Al <sup>vi</sup>                                                      | 1228    | 1410   | 1325     | 1305      | 893     | 1346    | 1371       | 1847    | 1842    | 1771    | 1800    |
| Ti                                                                    | 0       | 0      | 0        | 0         | 0       | 4       | 0          | 31      | 34      | 48      | 48      |
| Cr                                                                    | 245     | 537    | 590      | 627       | 1014    | 543     | 538        | 8       | 6       | 12      | 0       |
| Fe <sup>3+</sup>                                                      | 27      | 53     | 87       | 68        | 93      | 107     | 91         | 114     | 118     | 169     | 146     |
| Fe <sup>2+</sup>                                                      | 366     | 313    | 292      | 316       | 268     | 234     | 306        | 1023    | 1031    | 832     | 923     |
| Mg                                                                    | 2348    | 2518   | 2544     | 2503      | 2711    | 2498    | 2338       | 1345    | 1298    | 1459    | 1421    |
| Ca                                                                    | 258     | 3004   | 193      | 190       | 74      | 296     | 398        | 539     | 678     | 673     | 670     |
| Mn                                                                    | 32      | 20     | 20       | 21        | —       | 39      | 16         | 32      | 36      | 22      | 32      |
| Mg $\times 100$<br>Mg + Fe <sup>2+</sup>                              | 96,51   | 88,94  | 88,93    | 88,79     | 91,03   | 91,44   | 88,43      | 56,70   | 44,26   | 36,32   | 39,38   |

\*Coexiste com olivina DPS-15b; \*\*Coexiste com enstatita DPS-21b; \*\*\*Coexiste com olivina DPS-43b

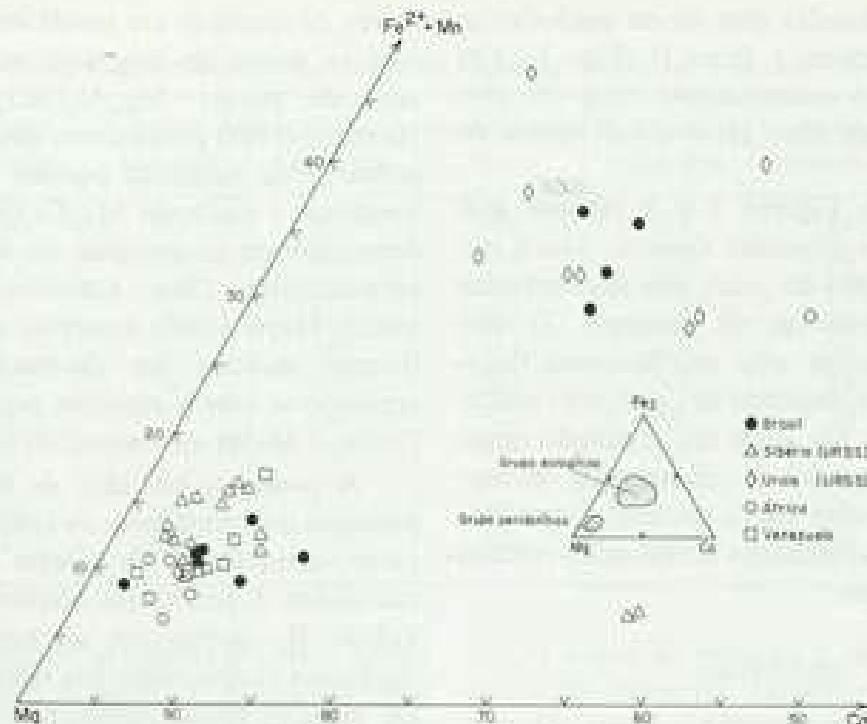


Fig. 3 — Diagrama ternário mostrando a variação da composição de granadas inclusas em diamantes do Brasil, comparada com material equivalente da União Soviética (Sibéria e Urais), África do Sul, Gana, Serra Leoa e Venezuela. Observa-se a existência de dois campos distintos: um, de natureza peridotítica, reunindo granadas magnesianas pobres de cálcio, e outro, menos numeroso, constituído por granadas de natureza eclogítica, com proporções equivalentes dos três elementos principais. Dados comparativos extraídos de Sobolev *et al.*, (1969, 1970, 1971, 1971a, 1972a); Meyer e Boyd, (1972); Sobolev, (1974); Prinz *et al.*, (1975); Meyer e Tsai, (1976); Svisero e Gomes, (1977).

O exame conjunto dos referidos gráficos comprova, nitidamente, a existência dos dois grupos de granadas, mencionados desde o início deste trabalho. O grupo mais abundante, o dos cromiopíropos, é constituído por granadas

altamente magnesianas, com proporções baixas de cálcio e ferro II (Fig. 3). Pobres em ferro III, apresentam variações acentuadas no que diz respeito aos seus teores de crômio e alumínio (Fig. 4). O segundo grupo, o das piropo-alman-

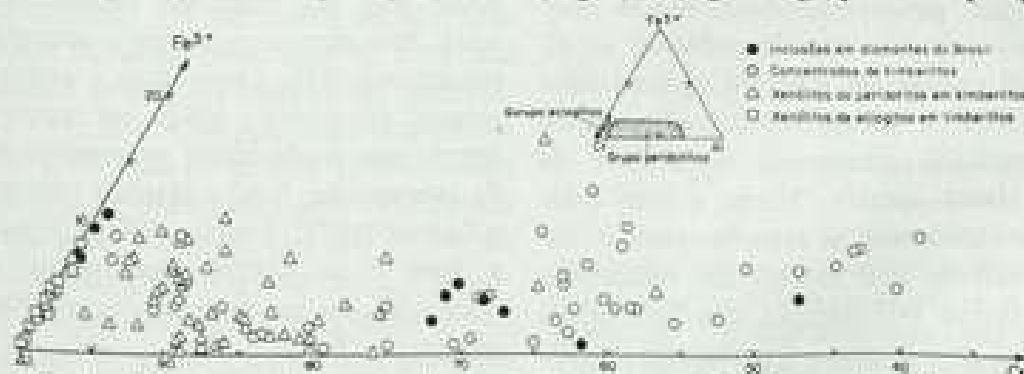


Fig. 4 — Diagrama ternário mostrando a variação da composição de granadas inclusas em diamantes do Brasil, comparada com material equivalente da União Soviética (Sibéria e Urais), África do Sul, Gana, Serra Leoa e Venezuela. As granadas inclusas em diamantes são geralmente pobres em Ferro III, as de natureza peridotítica contém teores variáveis de crômio; as de natureza eclogítica, por sua vez, caracterizam-se pela ausência de crômio em sua composição. Dados comparativos extraídos de Sobolev *et al.*, (1969, 1970, 1971, 1971a, 1972a); Meyer e Boyd, (1972); Sobolev, (1974); Prinz *et al.*, (1975); Meyer e Tsai, (1976); Svisero e Gomes, (1977).

dinas, reúne granadas com teores equivalentes de magnésio, cálcio e ferro II (Fig. 3). Em adição, elas são extremamente ricas em alumínio, pobres de ferro III e quase isentas de crômio.

Embora as Figuras 3 e 4 reúnam granadas de fontes afastadas entre si, vários milhares de km, não há entre elas discrepâncias químicas merecedoras de destaque. O alto teor em crômio de uma das inclusões brasileiras, a DPS-31a, cujo teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  é da ordem 17,33% (Tabela II), pode ser explicado como uma simples questão de amostragem. É provável que à medida que o número de análises aumentar, outras inclusões semelhantes venham a ser encontradas.

#### DISCUSSÃO

Diversas particularidades fazem dos cromiopirosos um grupo de granadas totalmente à parte, e portanto, merecedor de algumas considerações adicionais. Talvez a característica mais notável dessas granadas seja seus teores de crômio, cuja variação em  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  cobre todo intervalo entre 0,5 a 18,0% (Hornung e Nixon, 1973; Rost *et al.*, 1975). Os cromiopirosos são de ocorrência restrita na natureza. Além de inclusões em diamantes, eles aparecem esparsamente em xenólitos ultramáficos de kimberlitos, e em concentrados de kimberlitos (Reid e Hannor, 1970; Svisero, Meyer e Tsai, 1977).

Granadas piropo-cromíferas foram estudadas, pela primeira vez, por Nixon *et al.* (1963), que analisaram diversos concentrados de kimberlitos da antiga Basutolândia, região que corresponde atualmente ao Estado de Lesotho. Nessa ocasião, Nixon e seus colaboradores chamaram a atenção para a influência exercida pelo crômio em várias propriedades físicas. Por exemplo, eles observaram que o índice de refração e o parâmetro da cela unitária aumentavam proporcionalmente com o incremento do teor de crômio. Mas o ponto mais importante desse trabalho foi a observação de que algumas granadas continham mais crômio do que o necessário para formar a molécula de uvarovita  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ . Da mesma forma,

o teor de alumínio era insuficiente para balancear os teores de magnésio na formação da molécula piropo  $\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ . Nixon e Hornung (1968) propuseram que os excessos de crômio e de magnésio podiam se combinar e constituir a molécula  $\text{Mg}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ , que eles denominaram knorringita, em homenagem ao mineralogista Oleg Knorring. Simultaneamente, Meyer (1968) descreveu granadas semelhantes, inclusas em diamantes da África, seguindo-se outros registros por Sobolev *et al.* (1969), e Meyer e Svisero (1973).

A presença, ou não, de knorringita é a principal diferença entre os cromiopirosos e as piropo-almandinas. Os valores da Tabela III, calculados a partir das análises químicas da Tabela II, apresentam as porcentagens das moléculas constituintes das referidas granadas. Os cálculos foram conduzidos obedecendo à sequência de colocação dos dados da Tabela III. Piropo e knorringita são as principais moléculas dos cromiopirosos, perfazendo, juntas, valores entre 78,0 e 88,0%. Almandina varia em torno de 10,0%, cabendo aos demais termos, grossulária, andradita e espessartita, porcentagens menores. O teor de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  influi decisivamente na quantidade de knorringita que, por sua vez, guarda relações diretas com a molécula piropo. Aumentando o teor de knorringita, diminui o teor de piropo, e vice-versa.

As piropo-almandinas, como o próprio nome diz, são formadas essencialmente por esses dois termos que juntos somam aproximadamente 80%. Grossulária e andradita participam da solução sólida em teores equivalentes, que ainda inclui proporções reduzidas de espessartita. Reid e Hannor (1970), Gurney e Switzer (1973), Sobolev (1974), Switzer (1975) e Reid *et al.* (1976), descreveram granadas com composições semelhantes em kimberlitos de diversos locais.

A incorporação do crômio na estrutura dos cromiopirosos se faz às expensas do alumínio. Este fato está bem evidenciado pela Figura 5, que mostra a variação dos óxidos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , entre as inclusões estudadas e granadas piropo cromíferas, de origem kim-

TABELA III

Porcentagens das Moléculas Constituintes das Granadas Inclusas em Diamantes Brasileiros

|         | $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$<br>Espessartita | $Ca_3Fe_3(SiO_4)_3$<br>Andradita | $Mg_3Cr_3(SiO_4)_3$<br>Knorringita | $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$<br>Piropo | $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$<br>Almandina | $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$<br>Grossularia | Total |
|---------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------|
| DPS-40b | 1,0                                 | 1,3                              | 37,2                               | 40,8                          | 12,1                             | 7,6                                | 100,0 |
| DPS-8a  | 0,6                                 | 2,6                              | 26,9                               | 57,2                          | 10,4                             | 3,0                                | 100,7 |
| DPS-15a | 0,6                                 | 4,0                              | 29,0                               | 55,5                          | 9,5                              | 2,0                                | 100,5 |
| DPS-21a | 0,7                                 | 3,5                              | 31,0                               | 52,1                          | 10,5                             | 2,2                                | 100,0 |
| DPS-31a | —                                   | —                                | 50,8                               | 37,4                          | 8,9                              | 2,5                                | 99,6  |
| DPS-42b | 1,0                                 | 5,0                              | 27,0                               | 56,5                          | 7,5                              | 3,5                                | 100,5 |
| DPS-43a | 0,4                                 | 4,0                              | 26,9                               | 51,5                          | 10,0                             | 7,5                                | 100,3 |
| DPS-47a | 1,0                                 | 8,4                              | 0,4                                | 43,5                          | 33,4                             | 12,8                               | 99,5  |
| DPS-22a | 1,0                                 | 8,5                              | 0,4                                | 42,5                          | 34,3                             | 13,5                               | 100,4 |
| DPS-25a | 0,6                                 | 12,4                             | 0,4                                | 47,5                          | 27,3                             | 12,4                               | 100,6 |
| DPS-57a | 1,0                                 | 12,0                             | 0,0                                | 47,0                          | 30,4                             | 10,4                               | 100,8 |

berlítica, incluindo: concentrados de kimberlitos (McGetchin e Silver, 1970; McCallum e Eggler, 1971; Hornung e Nixon, 1973; Sobolev *et al.*, 1973; Sobolev, 1974; Meyer, 1975; Svisero *et al.* 1977), e xenólitos ultramáficos de kimberlitos (Carswell e Dawson, 1970; Boyd 1974; Boyd e Nixon, 1975). Grosso modo, a substituição de  $Al^{3+}$  pelo  $Cr^{3+}$  não acarreta modificações na estrutura cristalina dos cromiopiropos, que é igual à estrutura dos piropos comuns (Novak e Meyer, 1970). As únicas alterações são pequenas distorções, resultantes das diferenças entre os raios iônicos do alumínio e do crômio, mas que são perfeitamente negligenciáveis.

Entre as propriedades físicas, a cor, o índice de refração e o parâmetro da cela unitária sofrem variações consideráveis, à medida que aumenta o teor de crômio na granada. Hornung e Nixon (1973), após correlacionarem a cor com a variação de crômio, estabeleceram quatro grupos de cores principais: 1) vermelha escura (piropos contendo de 1,0 a 2,0 de  $Cr_2O_3$ ); 2) vinho (2,0 a 7,0% de  $Cr_2O_3$ ); 3) violeta (7,0 a 12,0% de  $Cr_2O_3$ ); e 4) verde escuro (12,0 a 18,0% de  $Cr_2O_3$ ). Os valores máximos de crômio até agora observados em granadas naturais continuam sendo aqueles estabelecidos por Nixon e Hornung (1968) e Meyer e Svisero (1975), que encontraram 17,4% de  $Cr_2O_3$ , em piropos associados a kimberlitos e diamantes, respectivamente.

O índice de refração é outra propriedade que sofre variação, aumentando linearmente

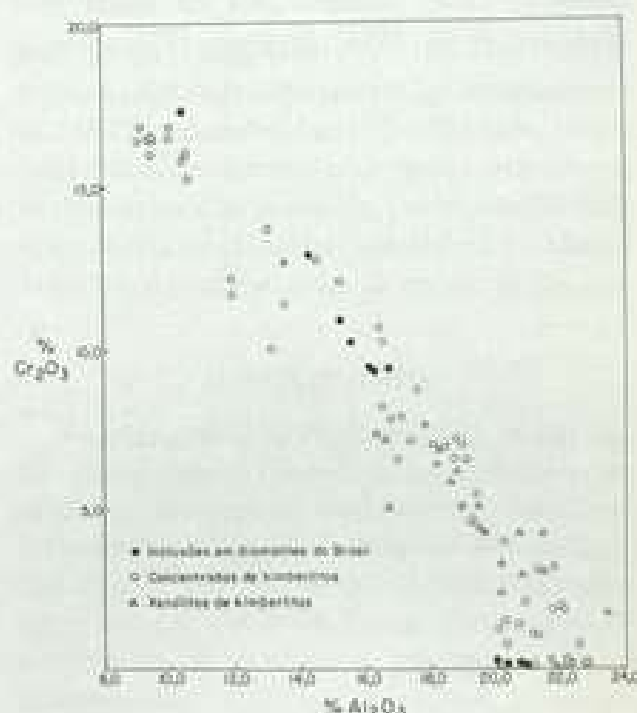


Fig. 5 — Relação entre os teores de alumínio e crômio de granadas inclusas em diamantes do Brasil, comparada com material equivalente constituído de concentrados e xenólitos de peridotitos de natureza kimberlítica. Aumentando o teor de crômio, diminui o teor de alumínio, e vice-versa. Essa variação, aproximadamente linear, mostra que esses dois elementos se substituem na rede cristalina da granada. Dados comparativos extraídos de McGetchin e Silver, (1970); Carswell e Dawson, (1970); McCallum e Eggler, (1971); Hornung e Nixon, (1973); Sobolev *et al.*, (1973); Boyd, (1974); Sobolev, (1974); Meyer, (1975); Boyd e Nixon, (1975); Svisero *et al.*, (1977).

com o incremento de crômio na granada. Este comportamento está ilustrado na Figura 6, através de quatro granadas inclusas em diamantes brasileiros, e por granadas constituintes de concentrados de kimberlitos (Nixon *et al.*, 1963; Nixon e Hornung, 1968) e de xenólitos peridotíticos de kimberlitos (Sobolev *et al.*, 1969a; Sobolev, 1974). Ocorre fato semelhante com o parâmetro da cela unitária (Nixon *et al.*, 1963; Rost *et al.*, 1975).

A origem das granadas inclusas nos diamantes brasileiros está bem evidenciada pelos diagramas ternários das Figuras 7 e 8, onde as referidas inclusões são comparadas com granadas de materiais kimberlíticos diversos, incluindo xenólitos de peridotitos (Sobolev *et al.* 1969a; MacGregor e Carter, 1970; Boyd e Nixon, 1972; Cox *et al.* 1973; Bloomer e Nixon, 1973; Nixon e Boyd, 1973; Boyd, 1974; Sobolev, 1974), concentrados de kimberlitos (Sobolev *et al.* 1973; Switzer, 1975; Svisero

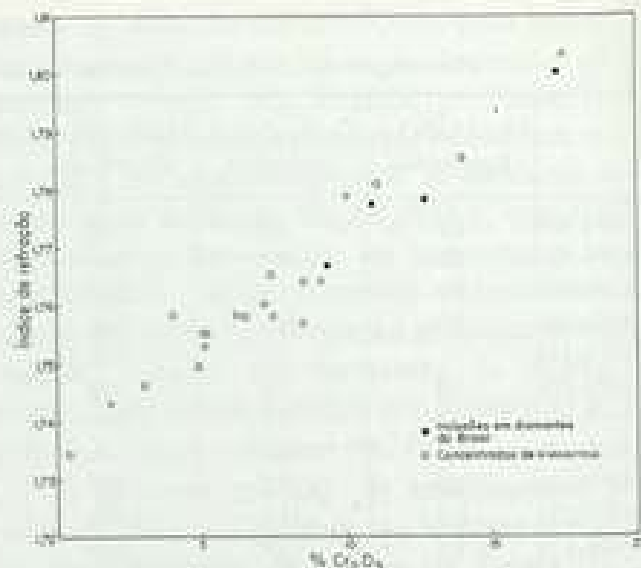


Fig. 6 - Variação dos índices de refração de granadas kimberlíticas em função dos seus respectivos teores de crômio. Os índices de refração aumentam, de forma aproximadamente linear, com o aumento do teor de crômio na granada. Dados comparativos extraídos de Nixon *et al.*, (1963); Nixon e Hornung, (1968); Sobolev *et al.*, (1969); Sobolev *et al.*, (1970) e Sobolev, (1974).

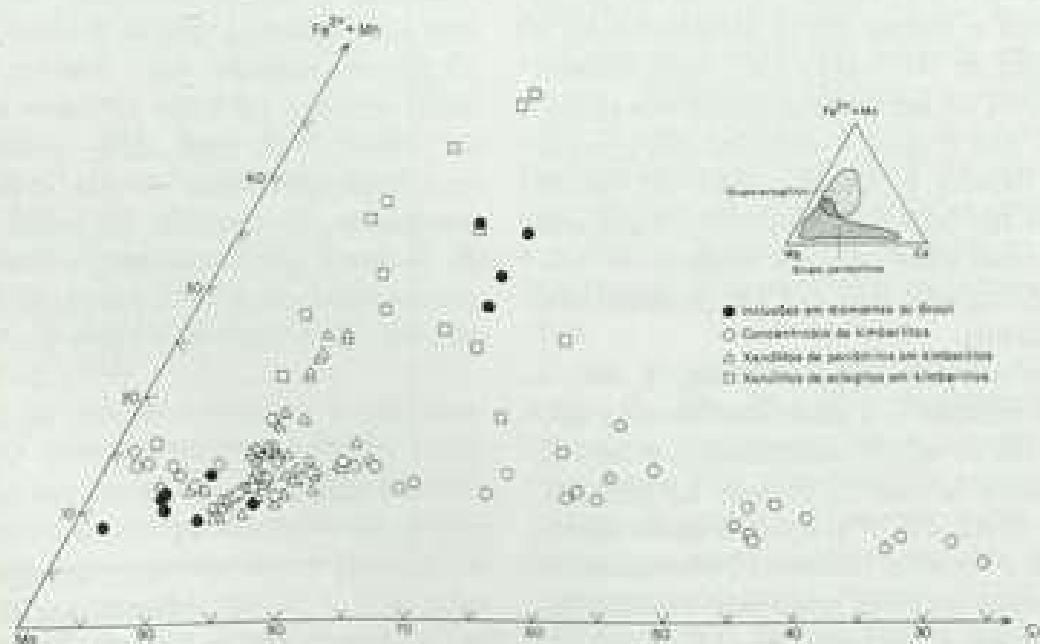


Fig. 7 - Variação da composição de granadas inclusas em diamantes do Brasil comparada com a de granadas constituintes de xenólitos de peridotitos e eclogitos de natureza kimberlítica, e concentrados de kimberlitos. As granadas de natureza ultramáfica ou peridotítica apresentam variação ampla no que diz respeito aos elementos magnésio e cálcio, e variação restrita em relação ao Ferro II. Com relação às granadas de natureza eclogítica, a variação é menos acentuada, e envolve principalmente os elementos magnésio e ferro II. Entre as inclusões estudadas a maior parte encontra-se no campo correspondente às granadas de natureza peridotítica. Dados comparativos extraídos de Kushiro e Aoki, (1968); Sobolev *et al.*, (1969a); MacGregor e Carter, (1970); Meyer e Brookins, (1971); Boyd e Nixon, (1972); Cox *et al.*, (1973); Bloomer e Nixon, (1973); Nixon e Boyd, (1973); Sobolev *et al.*, (1973); Sobolev, (1974); Boyd, (1974); Switzer, (1975); Reid *et al.*, (1976); Svisero *et al.*, (1977).

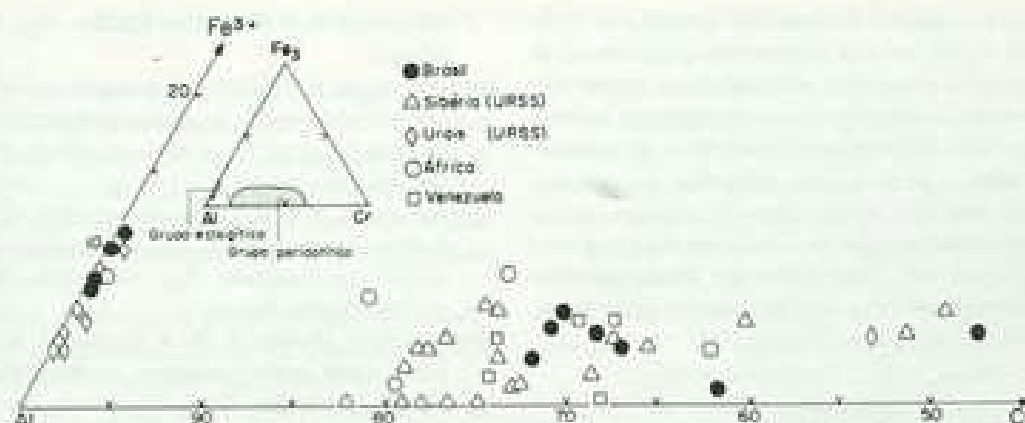


Fig. 8 - Variação da composição de granadas inclusas em diamantes do Brasil comparada com a de granadas constituintes de xenólitos de peridotitos e eclogitos de natureza kimberlítica, e concentrados de kimberlitos. As granadas de natureza ultramáfica ou peridotítica apresentam variação ampla no que diz respeito aos elementos alumínio e cromo e, dessa forma, diferenciam-se facilmente das granadas de natureza eclogítica, que além de não possuírem cromo, variam muito pouco em relação aos elementos alumínio e ferro III. Dados comparativos extraídos de Kushiro e Aoki, (1968); Sobolev *et al.*, (1969a); MacGregor e Carter, (1970); Meyer e Brookins, (1971); Boyd e Nixon, (1972); Cox *et al.*, (1973); Bloomer e Nixon, (1973); Nixon e Boyd, (1973); Sobolev *et al.*, (1973); Sobolev (1974); Boyd, (1974); Switzer, (1975); Reid *et al.*, (1976); Svisero *et al.*, (1977).

*et al.* 1977) e xenólitos de eclogitos (Kushiro e Aoki, 1968; Meyer e Brookins, 1971; Reid *et al.* 1976). A análise conjunta desses gráficos mostra claramente que as granadas inclusas nos diamantes estudados possuem duas paragéneses distintas: as piropo-almandinas são equivalentes às granadas constituintes dos xenólitos de eclogitos, sendo os cromopíropos semelhantes às granadas constituintes dos xenólitos de peridotitos. Comprova-se, dessa forma, que o diamante se cristaliza em dois ambientes distintos: um de natureza peridotítica, e outro de natureza eclogítica.

Boyd e Nixon (1973) e Nixon e Boyd (1973) discutiram pormenorizadamente a gênese dos xenólitos de natureza peridotítica, dos kimberlitos da África do Sul e de Lesotho. Os granada-lherzolitos, de textura granular, equilibram-se a pressões entre 40 e 50 kbars, e temperaturas de 900 a 1050°C. Já os granada-lherzolitos de textura cisalhada são de origem mais profunda, formando-se a pressões da ordem de 55 a 70 kbars, e temperaturas entre 1.100 a 1.450°C. Essas condições correspondem a profundidades de 140 a 200 km, indicando que a cristalização desses peridotitos granatíferos se processa no Manto Superior. Trabalhos experimentais de Bykova e Gens-

haft (1972) e Ringwood (1977) mostraram que a síntese dos cromopíropos exige temperaturas de 1450°C, e pressões entre 55 e 70 kbars. Todos esses dados, concordantes entre si, mostram que os diamantes e as granadas, por ele englobadas sob a forma de inclusões, cristalizam no Manto Superior, a profundidades da ordem de 200 km.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Henry O. A. Meyer, da *Universidade Purdue, Estados Unidos da América*, pela ajuda nas análises químicas; à *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)*, pelo auxílio financeiro e ao Prof. Dr. Nabor R. Rüegg, do *Instituto de Geociências da USP*, que gentilmente leu o manuscrito.

#### RESUMO

Determinações sistemáticas por meio da microsonda eletrônica indicaram que diamantes brasileiros, representativos das principais zonas de garimpos, contêm dois grupos distintos de granadas, sob a forma de inclusões minerais. Tais inclusões são idiomorfas, e suas dimensões variam entre 0,01 a 1 mm. O grupo mais numeroso, denominado cromopíropo, reúne cristais, cuja coloração varia entre vermelha, vinho e violeta, sendo constituídos, essencialmente, pelas moléculas piropo e knorringita. O segundo

grupo, menos freqüente, é formado por granadas de coloração laranja a mel, em cuja composição predominam as moléculas piropo e almandina. Comparadas a outros materiais de natureza kimberlítica, os cromiopropos assemelham-se a granadas constituintes de xenólitos de granada-lherzolitos, sendo o grupo piropo-almandina, por sua vez, equivalente a granadas de xenólitos de eclogitos. Essas características químicas indicam que as inclusões e os seus diamantes hospedeiros cristalizaram-se no Manto Superior em dois ambientes distintos: um de natureza peridotítica, outro de natureza eclogítica.

### SUMMARY

Garnets of peridotitic and eclogitic composition occur as syngenetic inclusions in Brazilian diamonds from several localities. The inclusions, identified by using electron microprobe techniques, are idiomorphic, and their dimensions range from 0.01 to 1 mm. Garnets of peridotitic composition have a characteristic red to purple color; furthermore they are rich in the pyrope molecule as well as in  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , being referred as chromium-pyrope. Their high chromium contents are matched only by garnets of garnet lherzolites found in kimberlites and garnets from kimberlite concentrates. Eclogitic garnets, on the other hand, are slightly less common, being orange to pale brown in color. They are enriched in pyrope and almandine molecules and are thus comparable to garnets of eclogite xenoliths from kimberlites. Chemical characteristics suggest that the inclusions as well as their diamond hosts crystallized in the Upper Mantle in two different chemical environments: one being predominantly peridotitic and the other eclogitic.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOYD, F. R., (1974), Ultramafic nodules from the Frank Smith Kimberlite pipe, South Africa, *Carnegie Inst. Wash., Yearbook 72*, pg. 285-294.
- BOYD, F. R. & NIXON, P. H., (1972), Ultramafic nodules from the Thaba Putsoa kimberlite pipe, *Carnegie Inst. Wash., Yearbook 71*, pg. 362-373.
- BOYD, F. R. & NIXON, P. H., (1973), Structure of the Mantle beneath Lesotho, *Carnegie Inst. Wash., Yearbook 72*, pg. 431-445.
- BOYD, F. R. & NIXON, P. H., (1975), Origin of the ultramafic nodules from some kimberlites of northern Lesotho and the Monastery Mine, South Africa, *Physics and Chemistry of Earth*, 9, pg. 431-454.
- BYKOVA YU. M. & GINSHAIT, YU. S., (1972), Synthesis of chrome garnets in the pyrope-knorringite series, *Geokhimiya*, 10, pg. 1291-1293.
- CARSWELL, D. A. & DAWSON, J. B., (1970), Garnet peridotite xenoliths in South African Kimberlites pipes and their petrogenesis, *Contr. Miner. Petrol.*, 25, pg. 163-184.
- COX, K. G., GURNEY, J. J. & HARTE, B., (1973), Xenoliths from the Matsoku pipe, In: *Lesotho kimberlites*, pg. 76-100, edited by P. H. NIXON, Lesotho Nat. Dev. Corp., Maseru.
- FUTERGENDLER, S. I., (1956), Estudo de inclusões em diamantes pelo método da análise estrutural por difração de raios X, *Zap. Vses. Mineral. Obshch.*, 85, pg. 568-569 (em russo).
- FUTERGENDLER, S. I. & FRANK-KAMENSKY, V. A., (1961), Inclusões orientadas de olivina, granada e cromioespinélio em diamante, *Zap. Vses. Min. Obshch.*, 90, pg. 230-236 (em russo).
- GURNEY, J. J., HARRIS, J. W. & RICHARDS, R. S., (1979), Silicate and oxide inclusions in diamonds from the Finsch Kimberlite Pipe, *Proc. Sec. Int. Kimberlite Conference*, 1, pg. 1-15, edited by F. R. BOYD & H. O. A. MEYER.
- HARRIS, J. W., HENRIQUES, R. & MEYER, H. O. A., (1967), Orientation of silicate inclusions in natural diamond, *Crystallography*, 7, pg. 118-123.
- HARRIS, J. W., MILLEDGE, H. J., BARRON, T. H. J. & MUNN, R. W., (1970), Thermal expansion of garnets included in diamond, *Journ. Geophys. Res.*, 75, pg. 5775-5792.
- HORNUNG, G. & NIXON, P. H., (1973), Chemical variations in the knorringite-rich garnets, In: *Lesotho Kimberlites*, pg. 122-127, edited by P. H. NIXON, Lesotho Nat. Dev. Corp., Maseru.
- HSIAO-MING, T., MEYER, H. O. A., MOREAU, J. & MILLEDGE, J. H., (1979), Mineral inclusions in diamond Premier, Jagersfontein and Finsch Kimberlites, South Africa, and Williamson Mine, Tanzania, *Proc. Sec. Int. Kimberlite Conference*, 1, pg. 16-26, edited by F. R. BOYD & H. O. A. MEYER.
- KUSHIRO, I. & AOKI, K. I., (1968), Origin of some eclogite inclusions in kimberlite, *Amer. Mineralog.*, 53, pg. 1347-1367.
- MACGREGOR, I. D. & CARTER, J. L., (1970), The chemistry of clinopyroxenes and garnets of eclogite and peridotite xenoliths from the Roberts Victor Mine, South Africa, *Phys. Earth Planet. Int.*, 3, pg. 391-397.
- MCGETCHIN, T. R. & SILVER, L. T., (1970), Compositional relations in minerals from kimberlite and related rocks in the Moses Rock Dike, San Juan Country, Utah, *Amer. Mineralog.*, 55, pg. 1738-1771.
- MCCALLUM, M. E. & EGGELER, D. H., (1971), Mineralogy of the Sloan diatreme, a kimberlite pipe in northern Larimer Country, Colorado, *Amer. Mineralog.*, 56, pg. 1735-1749.
- MEYER, H. O. A., (1967), Inclusions in diamond, *Carnegie Inst. Wash., Yearbook 66*, pg. 446-450.
- MEYER, H. O. A., (1968), Chrome pyrope: an inclusion in natural diamond, *Science*, 160, pg. 1446-1447.
- MEYER, H. O. A., (1975), Kimberlite from Norris Lake Eastern Tennessee: Mineralogy and Petrology, *Journal Geol.*, 83, pg. 518-526.
- MEYER, H. O. A. & BOYD, F. R., (1969), Inclusions in diamonds, *Carnegie Inst. Wash., Yearbook 68*, pg. 315-322.
- MEYER, H. O. A. & BROOKINS, D. G., (1971), Eclogite xenoliths from Stockdale kimberlite, Kansas, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 34, pg. 60-72.

- MEYER, H. O. A. & BOYD, F. R., (1972), Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, **36**, pg. 1255-1273.
- MEYER, H. O. A. & SVISERO, D. P., (1973), Mineral inclusions in Brazilian diamonds. *First Int. Conference on Kimberlites*, Extended Abstracts, pg. 125-128, Cape Town, South Africa.
- MEYER, H. O. A. & SVISERO, D. P., (1975), Mineral inclusions in Brazilian diamonds. *Physics and Chemistry of Earth*, **9**, pg. 785-795, Pergamon Press, New York.
- MEYER, H. O. A. & TSAI, H. M., (1976), The nature and significance of mineral inclusions in natural diamonds: A Review. *Miner. Sci. Eng.*, **8**, pg. 242-261.
- NIXON, P. H. & HORNUNG, G., (1968), A new chromium garnet and member knorringite, from kimberlites. *Amer. Mineralog.*, **53**, pg. 1833-1840.
- NIXON, P. H., KNORRING, O. VON & ROOKE, J. M., (1963), Kimberlites and associated inclusions: a mineralogical and geochemical study. *Amer. Mineralog.*, **48**, pg. 1090-1132.
- NIXON, P. H. & BOYD, F. R., (1973), Petrogenesis of the granular and sheared ultrabasic nodule suite in kimberlites. In: *Lesotho Kimberlites*, pg. 48-56, edited by P. H. NIXON, Lesotho Nat. Dev., Maseru.
- NOYAK, G. A. & MEYER, H. O. A., (1970), Refinement of the crystal structure of a chrome pyrope garnet: an inclusion in natural diamond. *Amer. Mineralog.*, **55**, pg. 2124-2127.
- PRENZ, M., MANNON, D. V., HLARA, P. E. & KEIL, K., (1975), Inclusions in diamond: garnet herzolite and eclogite assemblages. *Physics and Chemistry of Earth*, **9**, pg. 797-815, Pergamon Press, New York.
- REID, A. M., BROWN, R. W., DAWSON, J. B. & WHITFIELD, G. G., (1976), Garnet and pyroxene compositions in some diamondiferous eclogites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **58**, pg. 203-220.
- REID, A. M. & HANNOR, J. S., (1970), Pyrope in kimberlite. *Amer. Mineralog.*, **55**, pg. 1374-1379.
- RINGWOOD, A. E., (1977), Synthesis of Pyrope-Knorringite solid solution series. *Earth Plan. Sci. Lett.*, **36**, pg. 443-448.
- ROSE, F., BEERMANN, E. & AMTHAUSER, G., (1975), Chemical investigation of pyrope garnets in the Stockdale kimberlite intrusion, Riley County, Kansas. *Amer. Mineralog.*, **60**, pg. 675-680.
- SOBOLEV, N. V., (1974), *As inclusões profundas dos kimberlitos e o problema da composição do manto superior*. Editora Nauka, Divisão Siberiana, Novossibirsk, 264 pg. (em russo).
- SOBOLEV, N. V., BARTOSHINSKY, Z. V., YEFIMOVA, E. S., LAVRENT'YEV, YU. G. & POSPELOVA, L. N., (1970), Associação de olivina, granada e cromiodiopside em um diamante de Yakutia. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **192**, pg. 1349-1353, (em russo).
- SOBOLEV, N. V., BOTKUNOV, A. I., LAVRENT'YEV, YU. G. & POSPELOVA, L. N., (1971), Peculiaridades da composição dos minerais coexistentes com diamantes do kimberlito Mir, Yakutia. *Zap. Vses. Mineralog. Obshchestva*, **100**, pg. 558-564, (em russo).
- SOBOLEV, N. V., GNEYUSHIN, M. A., MIKHAILOVSKAYA, L. N., PUTERGENDLER, S. I., SHIMANINA, E. I., LAVRENT'YEV, YU. F. & POSPELOVA, L. N., (1971a), Composição de granadas e piroxênios de diamantes dos Urais URSS. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **198**, pg. 190-193, (em russo).
- SOBOLEV, N. V., LAVRENT'YEV, YU. G., POKHLENKO, N. P. & USOVA, L. V., (1973), Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**, pg. 39-52.
- SOBOLEV, N. V., LAVRENT'YEV, YU. G., POSPELOVA, L. N. & SOBOLEV, E. V., (1969), Cromiopropos de diamantes de Yakutia. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **189**, pg. 162-165, (em russo).
- SOBOLEV, V. S., NAY, B. S., SOBOLEV, N. V., LAVRENT'YU, G. & POSPELOVA, L. N., (1969a), Xenólitos de serpentinitos diamantíferos do kimberlito Aykhal, Yakutia. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **188**, pg. 1141-1143, (em russo).
- SOBOLEV, V. S., SOBOLEV, N. V. & LAVRENT'YU, G., (1972), Inclusões em diamantes de eclogitos diamantíferos. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, **207**, pg. 164-167, (em russo).
- SVISERO, D. P., (1971), Inclusões minerais em diamantes aluvionares dos rios Garças e Araguaia, MT. *Anais do 25.º Congr. Soc. Bras. Geol.*, **3**, pg. 227-233.
- SVISERO, D. P., (1975), O diamante das regiões centroleste de Mato Grosso e sudoeste de Goiás. Parte III: Inclusões minerais. *Rev. Gemologia*, **40**, pg. 33-42.
- SVISERO, D. P. & GOMES, J. B., (1977), Composição e origem de inclusões minerais em diamantes da Venezuela. *Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo*, **8**, pg. 21-30.
- SVISERO, D. P., MEYER, H. O. A. & TSAI, H. M., (1977), Kimberlite minerals from Vargem (Minas Gerais) and Redondão (Piau) diatremes, Brasil; and Garnet herzolite xenolith from Redondão diatreme. *Rev. Brasileira de Geociências*, **7**, pg. 1-13.
- SVISERO, D. P., (1978), *Composição química, origem e significado geológico de inclusões minerais em diamantes do Brasil*. Tese de Livre-Docência apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 165 pg.
- SWITZER, G. S., (1975), Composition of garnet xenocrysts from three kimberlite pipes in Arizona and New Mexico. *Miner. Sci. Investig.*, n.º 19, pg. 1-21, edited by B. MASON.