

Composição Química e Origem de Minerais Inclusos em Diamantes Brasileiros: Olivinas e Piroxênios*

(diamante/inclusões/olivina/piroxênio)

DARCY P. SVISERO

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

(Com 9 figuras no texto)

INTRODUÇÃO

Trabalhos desenvolvidos por Harris (1968), Meyer e Boyd (1972), Meyer e Svisero (1975), Svisero e Gomes (1977), Gurney *et al.* (1979) e Meyer e Gubelin (1981), entre outros, mostraram que o diamante contém diversos minerais aprisionados sob a forma de inclusões singenéticas. Olivinas, piroxênios, granadas, cromoespinélios, sulfetos, e o próprio diamante, figuram entre as fases mais frequentes; rutilo, ilmenita, zircão, coríndon, coesita e flogopita, são fases raras, constituindo registros isolados na literatura.

Dentro de uma linha de pesquisa iniciada a partir de 1971, Svisero (1971, 1974, 1978, 1980), e Meyer e Svisero (1973, 1975, 1980), descreveram sistematicamente os diversos minerais inclusos em diamantes do Brasil, que em linhas gerais, são semelhantes aos observados em diamantes da África, Sibéria, e demais locais estudados. Mais recentemente, Svisero (1981), discutiu pormenorizadamente aspectos relacionados à composição e origem de granadas identificadas em diamantes brasileiros, que foram então classificadas em dois grupos distintos denominados, respectivamente, grupo peridotítico e grupo eclogítico. Foi demonstrado que as granadas de natureza peridotítica reúnem cristais de

cor vermelha a violeta, em cuja composição predominam as moléculas piropo, knorringita e almandina. O segundo grupo de granadas, de natureza eclogítica, é formado por indivíduos de cor amarela a mel, constituídos pelas moléculas piropo e almandina, sendo porém isentos do termo cromífero knorringita. Com base nesses resultados, Svisero (1981) concluiu que as granadas peridotíticas formaram-se em condições idênticas às dos xenólitos de peridotitos encontrados em kimberlitos, enquanto que as granadas eclogíticas, de modo análogo, equilibraram-se sob condições semelhantes às dos xenólitos de eclogitos também encontrados em kimberlitos. Conforme demonstrado por Nixon e Boyd (1973), Sobolev (1977), e Dawson (1980), os referidos xenólitos originam-se do manto superior, a partir de profundidades situadas entre 150 a 200 km, definindo, conseqüentemente, as condições de formação do diamante na natureza.

Dando continuidade a essa pesquisa, o presente artigo discute aspectos relacionados ao quimismo das olivinas e dos piroxênios, que são exatamente os dois grupos que reúnem algumas das inclusões mais importantes, tanto em diamantes do Brasil, quanto em diamantes de outras localidades geográficas.

TÉCNICAS ANALÍTICAS

As olivinas e os piroxênios estudados foram extraídos do interior de diamantes re-

* Aceito para publicação em 24 de agosto de 1983; credenciado por WILLIAM G. R. DE CAMARGO. Com auxílios dos FAPESP, FINEP e CNPq.

TABLE I

Local de Amostragem dos Diamantes Portadores das Inclusões Analisadas

OLIVINAS			PROXÊNIOS		
Amostra	Mineral	Localização geográfica	Amostra	Mineral	Localização geográfica
DPS-35a	Forsterita	Rio Paraguaçu, Lençóis, BA	DPS-34a	Enstatita	Rio Jequitinhonha, Diamantina, MG
DPS-46a	Forsterita	Rio Machado, Machado, RO	DPS-55a	Enstatita	Rio Piranhas, Piranhas, GO
DPS-38a	Forsterita	Rio Tibagi, Tibagi, PR	DPS-51b	Enstatita	Rio Paraguaçu, Andaraí, BA
DPS-26a	Forsterita	Mina de Romaria, Romaria, MG	DPS-48a	Enstatita	Rio Poxoréu, Poxoréu, MT
DPS-12b	Forsterita	Rio Garças, Barra do Garças, MT	DPS-21b	Enstatita	Mina de Romaria, Romaria, MG
DPS-50a	Forsterita	Rio Jequitinhonha, Diamantina, MG	DPS-27a	Enstatita	Rio Bagagem, Estrela do Sul, MG
DPS-15b	Forsterita	Rio Garças, Barra do Garças, MT	DPS-42b	Enstatita	Rio Sapucaí-Mirim, Franca, SP
DPS-43b	Forsterita	Rio Paraguaçu, Lençóis, BA	DPS-52b	Enstatita	Mina de Romaria, Romaria, MG
DPS-55b	Forsterita	Rio Piranhas, Piranhas, GO	DPS-52a	Diopsídio	Mina de Romaria, Romaria, MG
DPS-64a	Forsterita	Rio Aripuanã, Aripuanã, MT	DPS-65a	Onfacita	Rio Paranaíba, Coromandel, MG
DPS-42a	Forsterita	Rio Sapucaí-Mirim, Franca, SP			

representativos das principais regiões de garimpos dos estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás, Bahia, Mato Grosso e Rondônia (Tabela I). Os diamantes selecionados previamente por conterem inclusões, foram submetidos a tratamentos químicos de limpeza, e posteriormente fragmentados, para liberação das fases inclusas. Algumas inclusões foram liberadas mediante oxidação lenta dos respectivos hospedeiros à temperatura de 800°C. Essa segunda técnica é funcional, especialmente para silicatos e óxidos, cujas composições não sofrem modificações durante o aquecimento. O mesmo não ocorre com os sulfetos que têm a propriedade de se reequilibrarem às novas temperaturas de oxidação falseando, dessa forma, a natureza das inclusões.

Uma vez isoladas, as inclusões foram examinadas em um microscópio eletrônico de varredura, dotado de um dispositivo de análise por raios X dispersivos, e posteriormente montadas em epoxi para as determinações analíticas na microsonda eletrônica. As análises foram executadas em um aparelho automático, modelo MAC-500, no Departamento de Geociências da Universidade Purdue, Estados Unidos da América. Informações complemen-

tares referentes à preparação das amostras e obtenção dos dados analíticos, encontram-se em Meyer e Svisero (1975) e Svisero (1978).

Como características gerais, os minerais inclusos nos diamantes brasileiros apresentam dimensões entre 1 e 0,01 mm, idiomorfismo acentuado, e cores características dependendo da espécie mineral. São frequentes associações de duas ou mais inclusões diferentes no mesmo diamante, especialmente associações bimineralicas reunindo olivina e enstatita, olivina e granada, ou ainda enstatita e granada. Associações entre três indivíduos constituem registros raros na literatura (Sobolev *et al.*, 1970; Meyer e Tsai, 1976a).

OLIVINA

É a inclusão mais freqüente em diamantes brasileiros, ocorrendo isolada, agrupada, ou na forma de enxames reunindo diversos indivíduos (Fig. 1). A cor varia de incolor a verde clara, acentuando-se ligeiramente após ser removida do interior do hospedeiro. Os cristais maiores apresentam-se circundados por uma faixa escura resultante da diferença entre o índice de refração do diamante 2,42, e os índices de refração da olivina, cujo valor médio é 1,65 (Fig. 1).

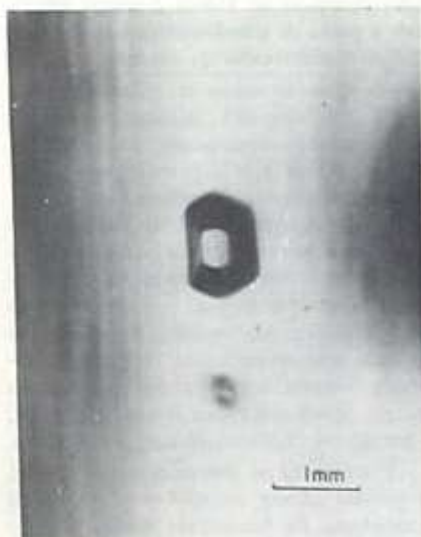


Fig. 1 - Cristais de olivina de hábitos diversos no interior do diamante hospedeiro.



Fig. 3 - Olivina desproporcionada em forma de gota.



Fig. 2 - Olivina prismática bituminada exibindo cavidades elipsoidais.

Os cristais de olivina, em geral idiomorfos, exibem hábito predominantemente prismático (Fig. 2). Algumas variações incluem indivíduos em forma de gota ou de pera (Fig. 3), ou ainda, formas tabulares, se houver desenvolvimento mais acentuado segundo (010). Geminados são raros, e o exemplar ilustrado na Figura 4 foi o único observado nessa pesquisa, durante a qual examinamos várias centenas de inclusões. Nesse caso, o plano de geminação (101) aparece tracejado facilitando a observação das olivinas geminadas.

Outro aspecto morfológico interessante diz respeito à presença de pequenas cavidades, em geral elipsoidais, como aquela ilustrada na Figura 2. O padrão regular e constante, a ausência de fraturas próximas, e a ocorrência relativamente freqüente dessa microestrutura, não só em olivinas, mas também em outras fases minerais, sugere que tais cavidades sejam uma feição primária dessas inclusões. É possível que a origem, nesse caso, esteja relacionada à perda de substâncias gasosas ainda na fase ígnea de cristalização, à semelhança do que ocorre com lavas básicas ricas em gases.

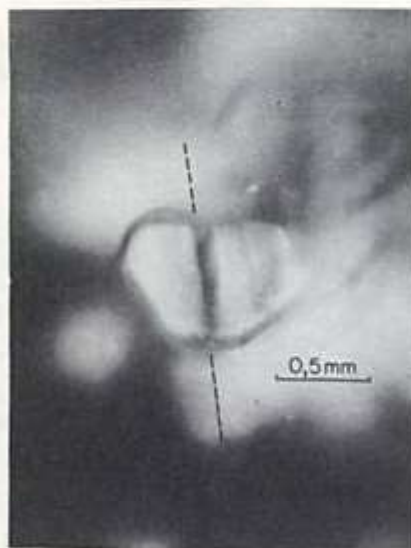


Fig. 4 - Olivinas geminadas segundo (101).

A presença de inclusões fluidas em diamantes procedentes da África foi assinalada por Melton e Giardini (1974), que determinaram, por meio de espectrometria de massa, os seguintes compostos, em ordem de abundância: água, hidrogênio, dióxido de carbono, metano, monóxido de carbono, nitrogênio, argônio, etileno, álcool etílico, buteno e oxigênio. A origem desses compostos foi discutida brevemente, e segundo os referidos autores, não há elementos suficientes para caracterizar se a origem é primária ou secundária. Outro aspecto não esclarecido, é se os gases provêm de fato do interior dos diamantes, ou então, dos minerais neles inclusos. Por outro lado, a presença de água e dióxido de carbono em olivinas constituintes de rochas básicas e ultrabásicas diversas, é um fato bem estabelecido, tendo sido discutido pormenorizadamente por Roedder (1965, 1976). Tudo indica, portanto, que as olivinas inclusas em diamantes contêm também inclusões fluidas, talvez os mesmos dióxido de carbono e água, já que essas duas substâncias são comuns em minerais kimberlíticos. Dessa forma, a origem das cavi-

dades ilustradas na Figura 2 estaria relacionada à perda de substâncias gasosas ocorrida durante a cristalização da olivina.

São comuns casos de epitaxia entre a olivina e o diamante. Segundo Mitchell e Giardini (1953), Futergendler *et al.* (1961), Camargo e Leite (1977), entre outros, o crescimento epitaxial mais freqüente é entre o plano (010) da olivina e o plano (111) do diamante. Esse intercrescimento pode ser identificado rapidamente ao microscópio, observando-se o diamante apoiado em uma das suas faces octaédricas. As inclusões de olivina que em geral apresentam a face (010) bem desenvolvida, surgem facilmente no campo, uma vez que o referido plano, devido à epitaxia, é paralelo à face octaédrica do diamante.

Examinadas ao microscópio polarizador, as olivinas exibem extinção reta, e cores de interferência de intensidade média. Quando no interior dos hospedeiros, apresentam-se circundadas por zonas de birrefringência anômala, caracterizadas por hipérboles irregulares e faixas de luminosidade variável. As demais propriedades ópticas não puderam ser devidamente caracterizadas devido às dimensões exiguas dos cristais.

Dados relativos à composição química estão apresentados na Tabela II. As onze olivinas analisadas não mostram variações significativas, apesar das enormes distâncias que separam os locais de amostragem, que incluem garimpos dos estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás, Bahia, Mato Grosso e Rondônia. A razão $Mg/Mg + Fe^{2+}$ varia entre 91,5 e 94,5, indicando que as olivinas analisadas pertencem ao termo forsterita. Comparadas com outras olivinas de natureza kimberlítica, as inclusões assemelham-se a olivinas constituintes de xenólitos de lherzolitos de textura granular freqüentemente encontrados em kimberlitos da África do Sul, Lesotho e União Soviética (Nixon e Boyd, 1973; Sobolev, 1977; Dawson, 1980).

Com relação aos elementos menores, as olivinas inclusas nos diamantes brasileiros contêm porcentagens pequenas de titânio, alumi-

TABLE II

Composição Química de Olivinas Inclusas em Diamantes Brasileiros

	DPS-35a	DPS-46a	DPS-38a	DPS-26a	DPS-12b	DPS-50a	DPS-15b	DPS-41b	DPS-31b	DPS-64a	DPS-62a
SiO ₂	41,31	40,42	40,84	40,71	42,11	40,73	41,80	40,74	41,16	41,03	41,59
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Al ₂ O ₃	< 0,04	0,02	0,02	0,02	0,04	< 0,01	0,04	0,04	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cr ₂ O ₃	0,05	0,11	0,10	0,10	0,10	0,08	0,10	0,08	0,08	0,11	0,10
FeO	7,98	8,02	7,17	7,84	5,24	7,26	7,06	7,82	7,66	7,44	8,55
MgO	50,07	51,31	52,08	50,36	52,02	51,70	50,39	51,13	50,96	51,44	51,25
CaO	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,06	0,07	0,03	0,07	0,04	0,03
MnO	0,11	0,09	0,10	0,10	0,10	0,13	0,11	0,10	0,11	0,14	0,10
NiO	0,40	0,39	0,28	0,28	0,41	0,39	0,37	0,50	0,56	0,42	0,59
Total	99,95	100,41	100,65	99,44	100,21	100,55	99,94	100,44	100,40	100,62	100,20

Número de cátions (× 1000) com base em 4 átomos de oxigênio											
	985	996	1000	985	1012	988	996	991	1004		
Al	0	1	1	1	0	1	0	0	0		
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Cr	1	2	2	2	2	2	2	2	2		
Fe	162	167	145	160	147	143	159	151	150	132	
Mg	1814	1858	1872	1836	1864	1818	1849	1839	1832	1843	1991
Ca	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	
Mn	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	
Ni	8	8	5	6	12	7	10	11	8	11	
Mg + 100											
Mg + Fe	91,8	91,9	92,8	92,0	94,5	92,7	92,7	92,1	92,4	92,5	93,4

nio, cromo, manganês, cálcio e níquel (Tabela II). Embora os teores de cromo das inclusões sejam relativamente baixos, eles são ligeiramente superiores aos das olivinas de outras associações ultramáficas. A Figura 5 mostra a variação da porcentagem em peso de Cr₂O₃ em função do valor de MgO entre olivinas de paragéneses diversas, incluindo além das inclusões estudadas, xenólitos de lherzolitos de texturas granular e cisalhada (Nixon e Boyd, 1973; Boyd e Nixon, 1975), komatiitos (Pike *et al.*, 1973), e basaltos lunares (Butler, 1973). Os teores de Cr₂O₃ das inclusões se equivalem aos das olivinas constituintes de lherzolitos de textura cisalhada, sendo superados, entretanto, pelos teores das olivinas de komatiitos e de basaltos lunares. As olivinas "spini-fex" são características de lavas komatiíticas encontrados em complexos ultramáficos arquenos de vários locais (Pike *et al.*, 1973). Admite-se que essas lavas, ao extravasarem na superfície terrestre, alcancem temperaturas da ordem de 1.500°C. Durante o resfriamento rápido que se segue, as olivinas neoformadas

adquirem textura particular, formada pelo embricamento de inúmeros cristais aciculares, de aspecto esquelético, que lembram certas gramineas do gênero *Spinifex*, comuns na Austrália. Seus teores em Cr₂O₃ são os mais altos para olivinas terrestres, sendo comparáveis aos das olivinas de basaltos lunares, cujos teores alcançam 0,45%.

Meyer (1975) estudou exhaustivamente o comportamento cristaloquímico do cromo nas olivinas de paragéneses diversas. Segundo o referido autor, o cromo das inclusões está sob a forma Cr²⁺, e sua incorporação é controlada pela fugacidade do oxigênio. Conclusões análogas foram apresentadas por Burns (1975). Estendendo suas considerações às olivinas lunares, Meyer (1975) admite condições redutoras acentuadas durante a cristalização das olivinas associadas a diamantes naturais. Essas idéias concordam com proposições anteriores de Kennedy e Nordlie (1968), que baseados em considerações físicoquímicas, mostraram que o diamante se forma na natureza em ambiente fortemente redutor.

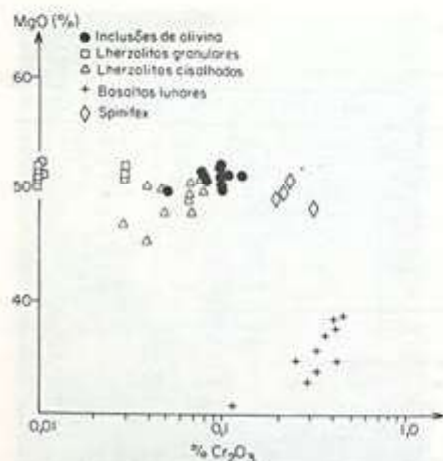


Fig. 5 - Variação dos teores de cromo e magnésio de olivinas incluídas em diamantes brasileiros comparadas com olivinas de origens diversas. Os valores de cromo das inclusões são relativamente altos para olivinas terrestres sendo superados apenas por olivinas de komatiitos. Dados comparativos extraídos de Butler (1972), Pike *et al.* (1973), Nixon e Boyd (1973) e Boyd e Nixon (1975).

PIROXÊNIO

Determinações sistemáticas de Sobolev *et al.* (1971), Prinz *et al.* (1975) e Gurney *et al.* (1979), mostraram que entre as inclusões minerais do diamante, ocorrem três tipos distintos de piroxênios: enstatita, diopsídio e onfacita. Em termos de frequência, a enstatita é uma das fases mais frequentes logo após a olivina e a granada; diopsídio e onfacita ocorrem esporadicamente constituindo inclusões raras na maior parte dos diamantes estudados até o presente momento. Essas características aplicam-se aos diamantes brasileiros investigados neste trabalho, e cujas áreas de amostragem estão discriminadas na Tabela I.

Enstatita: as inclusões de enstatita são muito semelhantes às olivinas e a distinção entre ambas só pode ser estabelecida com segurança mediante difração de raios X, ou análises na microsonda eletrônica. Contudo, no decorrer desta pesquisa anotamos uma série de particularidades que, embora não tenham caráter absoluto, facilitam a distinção entre

esses dois minerais. Durante a remoção mecânica das inclusões, é comum as enstatitas se clivarem, fato raramente observado entre as olivinas. Outra diferença curiosa pode ser notada durante a liberação das fases incluídas quando se usa o processo de oxidação do diamante a 800°C. Após combustão do hospedeiro, as olivinas adquirem tonalidade vermelha clara, enquanto as enstatitas permanecem incolores. Provavelmente, o ferro da estrutura da olivina é mais susceptível à oxidação do que o da enstatita, concordando com o comportamento desses minerais em outras situações onde a olivina, via de regra, se altera com maior facilidade do que a enstatita.

As enstatitas identificadas nos diamantes brasileiros exibem hábito prismático pouco variável (Fig. 6); dentro do hospedeiro apresentam-se incolores, porém, ao serem removidas, adquirem tonalidades ligeiramente esverdeadas. Observadas ao microscópio polarizador mostram extinção reta e ausência de pleocroísmo.



Fig. 6 - Enstatita prismática constituída pela combinação de várias formas simples.

TABLE III

Composição Química de Piroxênios Inclusos em Diamantes Brasileiros

	DPS-34a	DPS-55a	DPS-51b	DPS-48a	DPS-21b	DPS-27a	DPS-42b	DPS-52b	DPS-52a	DPS-65a
SiO ₂	56,69	57,30	57,57	57,55	57,57	57,27	57,85	57,20	55,20	54,30
TiO ₂	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05	0,80
Al ₂ O ₃	0,84	0,86	0,87	0,89	0,78	0,51	0,44	0,70	1,22	5,86
Cr ₂ O ₃	0,46	0,47	0,42	0,49	0,47	0,34	0,33	0,52	1,48	0,05
FeO	4,17	4,68	4,27	4,31	4,36	4,75	4,39	4,25	2,53	5,65
MgO	36,64	36,87	36,60	36,70	36,18	36,15	36,37	36,90	18,20	11,80
CaO	0,43	0,31	0,14	0,26	0,47	0,18	0,34	0,54	19,35	16,50
MnO	0,14	0,10	0,13	0,13	0,11	0,10	0,30	0,15	< 0,01	0,02
NiO	0,17	0,11	0,11	0,09	< 0,01	0,39	0,08	0,02	< 0,01	0,01
Na ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	2,12	4,85
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	—	—	0,05	0,12
Total	99,53	100,64	100,31	99,95	99,95	99,58	100,10	100,28	100,22	99,76

Número de cátions (× 1000) com base em 6 átomos de oxigênio										
	1953 34	1960 34	1964 35	1964 35	1971 34	1972 21	1976 17	1985 28	1990 10	1993 19
Si	1953	1960	1964	1964	1971	1972	1976	1985	1990	1993
Al ^{iv}	0	0	0	0	0	0	0	0	42	232
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22
Cr	12	13	17	13	13	9	8	14	42	1
Fe	120	133	122	129	125	137	125	120	76	172
Mg	1881	2038	1874	1861	1867	1855	1863	1882	2041	2036
Ca	16	11	5	9	17	7	12	20	747	645
Mn	4	3	4	4	3	3	8	4	0	0
Ni	5	3	3	3	—	11	2	1	0	0
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	148	328
K	—	—	—	—	—	—	—	—	2	5
Mg × 100 / Mg + Fe	94,0	93,4	93,8	93,5	93,6	93,1	93,8	94,0	92,8	78,9

Da mesma forma que as olivinas, a composição química das enstatitas é pouco variável, tanto no que diz respeito aos elementos químicos principais, quanto em relação aos elementos menores (Tabela III). Entre os elementos menores foram detectadas porcentagens reduzidas de titânio, alumínio, cromo, cálcio, manganês e níquel. Valores relativamente baixos de alumínio já eram esperados, tendo em vista as pressões elevadas reinantes durante a cristalização do diamante (Kennedy e Nordlie, 1968). Esse fato, aliás, é um dos fundamentos do barômetro geológico de MacGregor (1974), que será discutido logo a seguir. Observa-se ainda pela Tabela III, que as razões $Mg \times 100 / Mg + Fe^{2+}$ das enstatitas concentram-se em torno de 93,5%, sendo, portanto, menos variáveis do que as razões correspondentes das olivinas (Tabela II), cujos valores situam-se entre 91,5 e 94,5%.

O diagrama ternário da Figura 7 mostra que as enstatitas inclusas nos diamantes brasileiros são altamente magnesianas. Comparadas

com outras enstatitas de natureza kimberlítica, as inclusões assemelham-se a enstatitas constituintes de lherzolitos de textura granular, encontrados sob a forma de xenólitos em kimberlitos, sobretudo na África do Sul, Lesotho e Sibéria (Nixon e Boyd, 1973; Rolfe, 1973; Boyd e Nixon, 1975; Sobolev, 1977). Outro ponto a destacar na Figura 7 são as razões $Ca / Ca + Mg$ e $Mg + Fe^{2+}$ das inclusões e dos lherzolitos granulares, que além de semelhantes, apresentam variações pouco significativas. No tocante aos lherzolitos de textura cisalhada, a variação é mais acentuada, principalmente em relação aos valores $Mg / Mg + Fe^{2+}$.

Clinopiroxênios: amostragens cuidadosas nas principais regiões de garimpos do Brasil (Tabela I), não deixam dúvidas de que os clinopiroxênios são inclusões raras em nossos diamantes. Meyer e Boyd (1972) e Sobolev *et al.* (1971) já haviam ressaltado esse fato relativamente a diamantes de vários locais

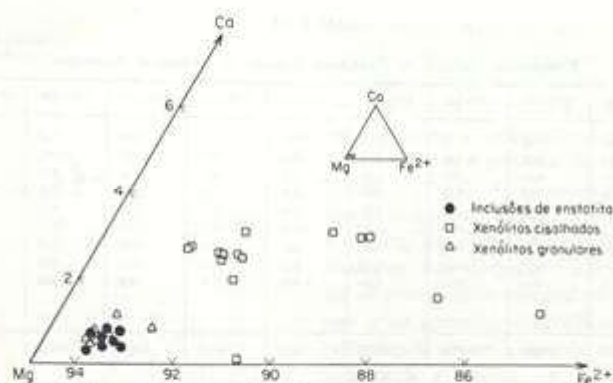


Fig. 7 - Variação da composição de enstatitas incluídas em diamantes brasileiros comparadas com enstatitas constituintes de lherzolitos de textura granular e cisalhada. As incluídas mostram composição constante e assemelham-se às enstatitas de lherzolitos granulares. Dados comparativos extraídos de Nixon e Boyd (1973), Rolfe (1973), Boyd e Nixon (1975) e Sobolev (1977).

da África (Gana, Serra Leoa, Costa do Marfim, África do Sul e Tanzânia), e União Soviética, respectivamente.

Contrastando com essas observações, Meyer e Tsai (1976a) constataram que os clinopiroxênios são frequentes entre os diamantes do kimberlito Premier, uma das minas mais importantes da África do Sul. Ao que tudo indica, a abundância nesse caso particular não está relacionada à idade pré-cambriana do referido kimberlito (Alsopp *et al.*, 1977), uma vez que diamantes pré-cambrianos de outros locais, incluindo Brasil e União Soviética, não contêm essa inclusão na frequência observada na Mina Premier. Tendo em vista essas discrepâncias, Gurney *et al.* (1979) empreenderam uma amostragem sistemática no kimberlito Finsch, situado também na África do Sul. Em um total de 232.000 diamantes, não foi encontrada uma única inclusão de clinopiroxênio. Conclusões semelhantes foram reportadas por Tsai *et al.* (1979), para diamantes dos kimberlitos Jagersfontein e Finsch, África do Sul, e Williamson, Tanzânia. Conclui-se, portanto, que ao contrário das demais inclusões, notadamente olivina, enstatita e granada, a frequência dos clinopiroxênios depende da procedência geográfica do diamante.

Dois clinopiroxênios identificados em diamantes detríticos da Mina de Romaria, MG, exibem cor verde e características morfológicas concordantes com materiais de outros locais descritos por Williams (1932), Harris (1968), Meyer e Tsai (1976a). Um dos espécimes exibe idiomorfismo perfeito, tornando possível o reconhecimento visual de suas formas cristalográficas (Fig. 8). É evidente o plano de simetria *ac*, bem como as faces correspondentes a diversos pinacóides. O segundo exemplar constitui intercrescimento complexo, ocorrendo disseminado em vários locais do diamante-hospedeiro.

Análises químicas apresentadas na Tabela III mostram que as duas inclusões possuem composições distintas, correspondendo, respectivamente, aos termos diopsídio e onfacita. O diopsídio distingue-se da onfacita pelos teores maiores de magnésio, cálcio e cromo, ao lado dos valores menores em titânio, alumínio, ferro, sódio e potássio. Sobolev *et al.* (1975) descreveram diopsídios de diamantes do kimberlito Mir, Yakutia, contendo altas proporções de cromo e sódio. Segundo esses autores, a incorporação desses elementos na estrutura do diopsídio reflete a ação de pressões intensas na gênese do diamante.



Fig. 8 — Diopsídio exibindo faces simétricas em relação ao plano ac normal à figura.

Na Figura 9, as duas inclusões estão projetadas no quadrilátero dos piroxênios, juntamente com piroxênios constituintes de lherzolitos granulares e cisalhados de locais diversos (Nixon e Boyd, 1973; Boyd e Nixon, 1975; Sobolev, 1977), e de xenólitos de eclogitos (Meyer e Brookins, 1971; Reid *et al.*, 1976). Na referida figura estão marcadas as temperaturas correspondentes ao "solvus" $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ a pressão de 30 Kbars, obtidas por Davis e Boyd (1966).

Os clinopiroxênios representativos de lherzolitos granulares exibem variações pequenas no que diz respeito às razões $Ca/Ca + Mg$ e $Mg/Mg + Fe^{2+}$. Suas temperaturas de cristalização situam-se na faixa 900-1.150°C, correspondendo aos valores mais baixos entre os xenólitos ultramáficos de kimberlitos. Variações maiores são características dos lherzolitos cisalhados, especialmente no tocante à razão $Ca/Ca + Mg$. Em adição, suas temperaturas de cristalização podem atingir valores de até 1.450°C. O campo dos xenólitos de eclogitos outro material freqüente em alguns kimber-

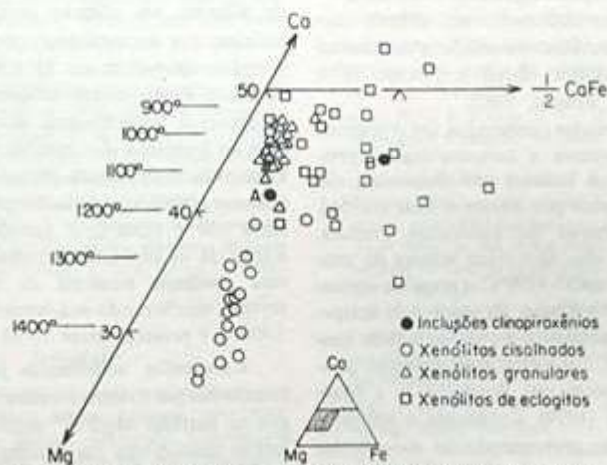


Fig. 9 — Variação da composição de clinopiroxênios incluídos em diamantes brasileiros comparados com clinopiroxênios constituintes de xenólitos de peridotitos (lherzolitos de textura granular e cisalhada), e de eclogitos. O diopsídio (A) projeta-se no campo dos lherzolitos granulares e a omfacita (B) no campo definido pelos eclogitos. As temperaturas são de Davis e Boyd (1966), e os demais dados comparativos de Meyer e Brookins (1971), Boyd e Nixon (1973), Nixon e Boyd (1973), Boyd e Nixon (1975), Reid *et al.* (1976) e Sobolev (1977).

litos, é relativamente mais amplo do que os dos lherzolitos, caracterizando-se por variações acentuadas das razões $\text{Ca}/\text{Ca} + \text{Mg}$ e $\text{Mg}/\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$. Com relação aos clinopiroxênios analisados, o diopsídio (ponto A) projeta-se no campo dos lherzolitos granulares, enquanto a onfacita (ponto B), cai na área definida pelos xenólitos de natureza eclogítica. Confirma-se, desse modo, a divisão genética das inclusões nos grupos peridotítico e eclogítico, comportamento já evidenciado pelas olivinas e enstatitas, bem como, pelo grupo das granadas discutido em trabalho anterior (Svisero, 1981).

AS INCLUSÕES COMO GEÔMETROS

Um dos resultados mais significativos do estudo das inclusões cristalinas do diamante, é a possibilidade de se estimar as condições de formação desse mineral na natureza. Sendo o diamante uma fase típica do manto superior (Meyer, 1982), os parâmetros referentes à gênese desse mineral têm implicações diretas com os modelos petrológicos do manto, muitos dos quais foram elaborados nos últimos anos a partir dos xenólitos ultramáficos de kimberlitos e de basaltos (Boyd e Nixon, 1973; Sobolev, 1977; Bussod, 1982).

Os únicos dados conhecidos, até o presente momento, referentes a temperaturas e pressões de minerais inclusos em diamantes, são aqueles reportados por Meyer e Tsai (1976b). Utilizando material do kimberlito Premier, África do Sul, eles obtiveram valores de temperatura na faixa 885-1270°C, e pressões variando entre 45 a 65 Kbars. Os valores de temperatura foram obtidos a partir do solvus enstatita-diopsídio, conforme procedimento adotado anteriormente por Boyd (1973), e MacGregor e Basu (1974). Conhecida a temperatura, as pressões correspondentes são obtidas a partir do conteúdo de Al_2O_3 dissolvido na enstatita, admitindo-se que os dois piroxênios se formaram em equilíbrio com a granada ou com o espinélio, desprezando-se as incertezas decorrentes do aumento de pressão (Mercier, 1976).

Vários obstáculos, entretanto, dificultam uma utilização mais ampla das inclusões do diamante como geômetros. Além do caráter esporádico desses minerais, há que se considerar as dificuldades analíticas tendo em vista as dimensões exíguas por eles exibidas. Outro fator limitante é a raridade das inclusões de clinopiroxênios, sendo mais rara ainda a ocorrência simultânea da enstatita com o diopsídio no mesmo diamante. Outro problema a considerar são as limitações dos diversos termômetros e barômetros geológicos conhecidos (Boyd, 1973; MacGregor, 1974; Akella, 1976; Danckwerth e Newton, 1978; Smith e Roden, 1981), revistos e criticados, entre outros, por Thompson e Harley, (1982).

A aplicação desses princípios a diamantes brasileiros forneceu resultados concordantes com aqueles obtidos por Meyer e Tsai (1976b) em diamantes africanos. Diopsídio e onfacita, os dois únicos clinopiroxênios até agora identificados, cristalizaram-se a temperaturas de 1.170°C e 1050°C, respectivamente (Fig. 9). Quanto ao par enstatita-diopsídio (DPS-65 a,b; Tabela III), a temperatura e o conteúdo de alumina em solução sólida na enstatita indicam que a cristalização se processou sob pressões da ordem de 50 Kbars, aproximadamente. Esses valores, embora aproximados, encaixam-se perfeitamente dentro das condições de formação dos xenólitos de peridotitos kimberlíticos de textura granular que, segundo Dawson (1980), são definidas por temperaturas entre 900 e 1.200°C, e pressões de 40 a 55 Kbars. Já os xenólitos correspondentes de textura cisalhada resultam de condições mais severas, equilibrando-se à temperatura de 1.200-1.450°C e pressões entre 55-70 Kbars (Fig. 9).

Conclusões semelhantes já haviam sido ressaltadas por Svisero e Valarelli (1977), baseados na partição Mg/Fe^{2+} entre olivinas e enstatitas coexistentes em diamantes do Brasil e da Venezuela. Apesar de não registrarem valores específicos de temperatura e de pressão, os referidos autores mostraram que as inclusões de natureza peridotítica, incluindo olivina, enstatita, diopsídio e cromopiropo, formaram-se sob condições idênticas às dos xenó-

litos de peridotitos, de textura granular. Com relação às inclusões de natureza eclogítica, onfacita e piropo-almândina, a gênese, nesse caso, guarda notáveis similaridades com os xenólitos de eclogitos de natureza kimberlítica.

AGRADECIMENTOS

Estes são devidos ao Prof. Dr. Henry O. A. Meyer, da Universidade Purdue, Estados Unidos da América, pelo auxílio prestado durante a fase de obtenção da maior parte dos dados analíticos discutidos, e ao Prof. Dr. Vicente A. V. Girardi, do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pela leitura do manuscrito. Somos gratos também à FAPESP, à FINEP e ao CNPq, que proporcionaram suporte financeiro em diversas fases desta pesquisa.

RESUMO

Olivinas e piroxênios ocorrem sob a forma de inclusões sinênticas em diamantes representativos das principais áreas de garimpos do Brasil. Olivina e enstatita apresentam similaridades cristalográficas e químicas, constituindo cristais prismáticos, incolores, com altos teores de magnésio. Diopsídio e onfacita são inclusões raras, exibindo ambas cor verde intensa. Quimicamente, as inclusões mostram similaridades com seus correspondentes constituintes de xenólitos ultramáficos de kimberlitos: olivina, enstatita e diopsídio assemelham-se a olivinas, enstatitas e diopsídeos de lherzolitos de textura granular, sendo a onfacita semelhante a onfacitas de eclogitos. Termômetros e barômetros geológicos indicam que os diamantes estudados se cristalizaram no manto superior, a profundidades de 200 km, em dois ambientes distintos: um, de natureza peridotítica, e outro, de natureza eclogítica.

SUMMARY

Syngenetic inclusions of olivines and pyroxenes were identified in Brazilian detritic diamonds using X-ray analyses and the electron microprobe. Olivines and enstatites are colorless, prismatic and rich in magnesium. Diopside and omphacite are emerald green and rare as inclusions in Brazilian diamonds. The mentioned inclusions resemble minerals of ultramafic xenoliths from worldwide kimberlites: olivine, enstatite and diopside are similar to their counterparts of granular lherzolites while omphacite is analogous to omphacite of eclogite xenoliths. These results agree with previous studies on diamond

inclusions mainly from Africa and Soviet Union and show that Brazilian diamonds crystallized at depths around 200 km in two distinctive parageneses, one being peridotitic and the other eclogitic.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKELLA, J. (1976), Garnet pyroxene equilibria in the system $\text{CaSiO}_3\text{-MgSiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ and in a natural mineral mixture. *Amer. Mineral.*, **61**: 589-598.
- ALLSOPP, H. L. & KRAMERS, J. D., (1977), Rb-Sr and U-Pb age determinations on southern African kimberlite pipes. *Ext. Abs. Sec. Intern. Kimberlite Conf.*, 11-13, Santa Fe, USA.
- BOYD, F. R. (1973), The pyroxene geotherm. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **37**: 2533-2546.
- BOYD, F. R. & NIXON, P. H., (1973), Structure of Upper Mantle beneath Lesotho. *Carn. Inst. Wash., Yearbook*, **72**: 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. *Phys. Chem. Earth*, **9**: 431-454.
- BURNS, R. G., (1975), On the occurrence and stability of divalent chromium in olivines included in diamonds. *Contr. Min. Petrol.*, **51**: 213-221.
- BUSOOD, G. Y., (1982), Nature of the continental Upper-Mantle/Lower-Crust transition beneath Kilbourne Hole, New Mexico. *Abst. Third International Kimberlite Conference, Terra Cognita*, **2**: 266-267, Paris.
- BUTLER, P. JR., (1972), Compositional characteristics of olivines from Apollo 12 samples. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **36**: 773-786.
- CAMARGO, W. G. R. & LEITE, C. R., (1977), Olivine epitaxy in Brazilian diamonds. *An. Acad. brasil. Ciênc.*, **48**: 234-244.
- DANCKWERTH, P. A. & NEWTON, R. C., (1978), Experimental determination of the spinel peridotite to garnet peridotite reaction in the system $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ in the range 900-1100°C and Al_2O_3 isopleths of enstatite in the spinel field. *Amer. Mineral.*, **63**: 189-201.
- DAVIS, B. T. C. & BOYD, F. R., (1966), The join $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6\text{-CaMgSi}_2\text{O}_6$ at 30 kilobars and its application to pyroxenes from Kimberlites. *Journ. Geophys. Res.*, **71**: 3567-3576.
- DAWSON, J. B., (1980), *Kimberlites and their xenoliths*. Springer-Verlag, New York.
- FUTERGENDLER, S. I. & FRANK-KAMENITSKY, V. A., (1961), Inclusões orientadas de olivina, granada e cromoespínelio em diamante. *Zap. Vses. Min. Obshch.*, **90**: 230-236 (Em russo).
- GURNEY, J. J., HARRIS, J. W. & RICHARDS, R. S., (1979), Silicate and oxide inclusions in diamond from the Finsch Kimberlite pipe. *Proc. Sec. Intern. Kimberlite Conf.*, **1**: 1-15, Amer. Geophys. Union, Washington.

- HARRIS, J. W., (1968), The recognition of diamond inclusion. Pt. 1: Syngenetic inclusions, Pt. 2: Epigenetic. *Ind. Diam. Rev.* 402-410 e 458-461, London.
- KENNEDY, G. C. & NORDLIE, B. E., (1968), The genesis of diamond deposits. *Econ. Geol.*, 63: 495-503.
- MACGREGOR, I. D., (1974), The system $MgO-Al_2O_3-SiO_2$: the solubility of Al_2O_3 in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions. *Amer. Mineral.*, 59: 110-119.
- MACGREGOR, I. D. & BASU, A. R., (1974), Thermal structure of the lithosphere: a petrologic model. *Science*, 185: 1007-1011.
- MILTON, C. E. & GIARDINI, A. A., (1974), The composition and significance of gas released from natural diamonds from Africa and Brazil. *Amer. Mineral.*, 59: 775-782.
- MERTZ, J. C. C., (1976), Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. *Amer. Mineral.*, 61: 603-615.
- MEYER, H. O. A., (1975), Chromium and the genesis of diamond. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 39: 929-936.
- MEYER, H. O. A., (1977), Mineralogy of the Upper Mantle: a review of the minerals in Mantle xenoliths. *Earth Sc. Rev.*, 13: 251-281.
- MEYER, H. O. A., (1982), The genesis of diamond. *Abst. Third International Kimberlite Conference, Terra Cognita*, 2: 199, Paris.
- MEYER, H. O. A., (1972), Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 36: 1255-1273.
- MEYER, H. O. A. & BROOKINS, D. G., (1971), Eclogite xenoliths from Stockdale kimberlite, Kansas. *Contr. Mineral. Petrol.*, 34: 60-72.
- MEYER, H. O. A. & GUBELIN, E., (1981), Ruby in diamond. *Gems Gemol.*, 17: 153-156.
- MEYER, H. O. A. & SVISERO, D. P., (1973), Mineral inclusions in Brazilian diamonds. *Proc. First Intern. Kimberlite Conf.* 125-128, Cape Town, South Africa.
- MEYER, H. O. A. & SVISERO, D. P., (1975), Mineral inclusions in Brazilian diamonds. *Phys. Chem. Earth*, 9: 785-795.
- MEYER, H. O. A. & SVISERO, D. P., (1980), Kimberlites and diamonds in Brazil: Windows to the Upper Mantle. *An. Acad. Brasil. Ciênc.*, 52: 819-824.
- MEYER, H. O. A. & TSAI, H. M., (1976a), The nature and significance of mineral inclusions in natural diamond: A Review. *Min. Sci. Eng.*, 8: 242-261.
- MEYER, H. O. A. & TSAI, H. M., (1976b), Mineral inclusions in natural diamond. Temperature and pressure of equilibration. *Science*, 191: 849-851.
- MITCHELL, R. H. & GIARDINI, A. A., (1953), Oriented olivine inclusions in diamond. *Amer. Mineral.*, 38: 136-138.
- NIXON, P. H. & BOYD, F. R., (1973), Petrogenesis of the granular and sheared ultrabasic nodule suite in kimberlites. Em: NIXON, P. H. (Editor). *Lesotho Kimberlites*. Lesotho Nat. Dev. Corp., Maseru, 48-56.
- PIKE, D. R., NALDRETT, A. J. & ECKSTRAND, O. R., (1973), Archaen ultramafic flows in Munro Township, Ontario. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 84: 955-970.
- PRINZ, M., MANSON, D. V., HLARA, P. E. & KEIL, K., (1975), Inclusions in diamond: garnet ilmenite and eclogite assemblages. *Phys. Chem. Earth*, 9: 797-815.
- REID, A. M., BROWN, R. W., DAWSON, J. B. & WHITFIELD, G. G., (1976), Garnet and pyroxene compositions in some diamondiferous eclogites. *Contr. Min. Petrol.*, 58: 203-220.
- ROEDDER, E., (1965), Liquid CO_2 inclusions in olivine bearing nodules and phenocrysts from basalts. *Amer. Mineral.*, 50: 1746-1782.
- ROEDDER, E., (1976), Petrologic data from experimental studies on crystallized silicate melt and other inclusions in lunar and Hawaiian olivine. *Amer. Mineral.*, 61: 684-690.
- ROLFE, D. G., (1973), The geology of Kao kimberlite pipe. Em: NIXON, P. H. (Editor). *Lesotho Kimberlites*. Lesotho Nat. Dev. Corp., Maseru, 101-109.
- SMITH, D. & RODEN, M. F., (1981), Geothermometry and kinetics in a two spinel peridotite nodule, Colorado Plateau. *Amer. Mineral.*, 66: 334-345.
- SOBOLEV, N. V., (1977), Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the Upper Mantle. *Amer. Geophys. Union*, Washington.
- SOBOLEV, N. V., BARTOSHINSKY, Z. V., YEFIMOVA, E. S., LAVRENT'YEV, YU. G. & POSPELOVA, L. N., (1970), Associação de olivina, granada e cromodipsídio em diamante de Yakutia. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 192: 1349-1353 (Em russo).
- SOBOLEV, N. V., GNEVUSHEV, M. A., MIKHAILOVSKAYA, L. N., FUTERGENDIER, S. I., SHIMANINA, E. I., LAVRENT'YEV, YU. G. & POSPELOVA, L. N., (1971), Composição de granadas e piroxênios de diamantes dos Urais, URSS. *Dokl. Akad. Nauk. SSR*, 198: 190-193 (Em russo).
- SOBOLEV, V. S., SOBOLEV, N. V. & LAVRENT'YEV, YU. G., (1975), Chrome-rich pyroxenes from the kimberlites of Yakutia. *Neues Jb. Miner. Abh.*, 123: 213-218.
- SVISERO, D. P., (1971), Inclusões minerais em diamantes aluvionares dos rios Graças e Araguaia, MT. *An. 25º Congr. Bras. Geol.*, 3: 227-233.
- SVISERO, D. P., (1974), O diamante das regiões centroleste de Mato Grosso e sudoeste de Goiás. Parte 3: Inclusões minerais. *Rev. Gemol.*, 20: 33-42.
- SVISERO, D. P., (1978), Composição química, origem e significado geológico de inclusões minerais de diamantes do Brasil. Tese de Livre-docência, Instituto de Geociências da USP.
- SVISERO, D. P., (1980), Inclusões minerais de diamantes brasileiros. Parte 1: Óxidos e outras inclusões menos frequentes. Parte 2: Silicatos. Parte 3: Significado geológico. *An. 31º Congr. Bras. Geol.*, 4: 2313-2324, 2325-2339 e 2340-2352.
- SVISERO, D. P., (1981), Composição química e origem de minerais incluídos em diamantes brasileiros: Granadas. *An. Acad. Brasil. Ciênc.*, 53: 153-163.

- SVISERO, D. P. & GOMES, J. B., (1977), Composición y origen de inclusiones minerales en diamantes de Venezuela. *An. 5.º Congr. Geol. Venezolano*, **3**: 1225-1234, Caracas.
- SVISERO, D. P. & PIMENTEL, C. A., (1970), Microestruturas em superfícies (110) de diamantes do Brasil. *An. 2.º Congr. Ibero-Amer. Cristal.*, 137-147, Buenos Aires.
- SVISERO, D. P. & VALARELLI, J. V., (1977), Partição Mg/Fe^{2+} entre olivinas e ortopiroxênios coexistentes em diamantes naturais. *An. Acad. brasil. Ciênc.*, **49**: 237-241.
- THOMPSON, A. B. & HARLEY, S. L., (1982), Mantle material assemblage and palaeogeotherms. *Abst. Third International Kimberlite Conference, Terra Cognita*, **2**: 225-226, Paris.
- TSAL, H. M., MEYER, H. O. A., MOREAU, J. & MILLEDGE, J. H., (1979), Mineral inclusions in diamonds from Premier, Jagersfontein and Finsch Kimberlites, South Africa, and Williamson Mine, Tanzania. *Proc. Sec. Intern. Kimberlite Conf.*, **1**: 16-26. Amer. Geophys. Union, Washington.
- WILLIAMS, A. F., (1932), *The genesis of diamond*, 2 vols. E. Benn, London.