Cirano Rocha Leite

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005272

MINERALOGIA E CRISTALOGRAFIA
DO DIAMANTE DO TRIÂNGULO MINEIRO

Tese de Doutorado apresentada à Cadeira de Mineralogia da
Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da
Universidade de São Paulo

1969

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO	1
1. HISTÓRICO E TRABALHOS ANTERIORES	1
2. SITUAÇÃO GEOGRÁFICA E GEOLÓGICA	3
3. AMOSTRAGEM	5
II. MÉTODOS DE ESTUDO	7
1. MICROSCOPIA ÓPTICA	7
2. INTERFEROMETRIA	9
3. DIFRAÇÃO DE RAIOS X	10
a. Método de Laue	10
b. Método do pó	11
c. Método da precessão	11
4. ABSORÇÃO AO INFRAVERMELHO	17
5. FLUORESCÊNCIA	17
6. MÉTODOS QUÍMICOS	17
III. GENERALIDADES SÔBRE O DIAMANTE	18
1. CRISTALOGRAFIA	19
2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA	20
3. PROPRIEDADES FÍSICAS	21
4. VARIEDADES	23
5. OCORRÊNCIA	24
6. SÍNTESE	24
IV. MORFOLOGIA	26
1. FORMAS SIMPLES	28
a. Hábito octaédrico	28
b. Hábito rombododecaédrico	30
c. Hábito cúbico	32

	ii
2. FORMAS COMBINADAS	32
3. FORMAS IRREGULARES	33
4. GEMINADOS	34
5. FREQUÊNCIA DAS FORMAS CRISTALOGRÁFICAS	37
6. ORIGEM DAS FORMAS CRISTALOGRÁFICAS	37
V. FIGURAS E ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIE	42
1. FACES DE OCTAEDRO	43
2. FACES DE ROMBODODECAEDRO	46
3. FACES DE CUBO	50
4. ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIE EM GEMINADOS	51
VI. ESPECTROSCOPIA	53
1. ESPECTROGRAFIA DE ABSORÇÃO AS RADIAÇÕES INFRAVERMELHAS	53
2. FLUORESCÊNCIA	57
VII. INCLUSÕES	59
1. OLIVINA	61
a. Morfologia	62
b. Difração de raios X	63
c. Composição química	66
d. Orientação	67
2. GRANADA	75
3. CROMITA	81
4. PENTLANDITA	84
5. DIAMANTE	84
6. INCLUSÕES NÃO IDENTIFICADAS	85
VIII. CONCLUSÕES	89
1. PARAGÊNESE PRIMÁRIA	89
2. ESTUDO COMPARATIVO	90
3. CONSIDERAÇÕES GERAIS	91
IX. AGRADECIMENTOS	93
X. BIBLIOGRAFIA	95

RESUMO

O presente trabalho procura caracterizar o diamante do Triângulo Mineiro, através de sua morfologia, figuras e estruturas de superfície, propriedades espectroscópicas (absorção ao IV. e fluorescência ao UV.) e, principalmente, pelas inclusões minerais, estudo que poderá conduzir, com maior segurança, os trabalhos geológicos futuros, em busca da matriz primária, ainda desconhecida.

O estudo morfológico revelou a predominância do hábito rombo dodecaédrico, entre as formas simples presentes, sendo também frequentes os geminados (33% do total). A predominância da forma rombododecaédrica, com faces arredondadas, é explicada, aqui, como resultado de dissolução natural, em ambientes oxidantes. O rombododecaedro - forma de equilíbrio durante tal processo - foi deduzido pela variação de velocidade de dissolução, levando-se em conta a estrutura cristalina do diamante.

As figuras de superfície são, em linhas gerais, as mesmas já observadas em diamantes de outras procedências, tendo-se notado somente algumas estruturas e figuras superficiais ainda não descritas. A origem destas figuras pode ser admitida como consequência de corrosão natural do diamante, o que se confirma pela sua presença em sólidos de clivagem.

Os diagramas de absorção ao infravermelho, acusaram uma frequência anômala de diamantes do tipo Ib, raros entre os diamantes naturais. Esta observação deve ser confirmada por estudos futuros, e talvez constitua uma das principais características do diamante do Triângulo Mineiro.

As inclusões minerais, identificadas através da difração de raios X (método da precessão): forsterita, piropo, magnesiocromita e pentlandita, sugerem processos genéticos ligados ao magmatismo ultrabásico. A presença de efeitos secundários no hospedeiro (birrefringência anômala e fraturas de tensão), além do fato de estas inclusões ocorrerem epitaxialmente orientadas no diamante, afastam qualquer hipótese de preenchimento secundário.

A paragênese primária, indicando o equilíbrio

forsterita + espinélio + coesita $\rightleftharpoons$ piropo

talvez permita estimar as condições de pressão e temperaturas ambientes durante a cristalização do diamante.

I. INTRODUÇÃO

Desde o século passado, procurou-se elucidar o problema da origem do diamante brasileiro, principalmente através de métodos exclusivamente geológicos. As controvérsias que até hoje perduram talvez pudessem ser explicadas pela falta de um estudo mineralógico inicial, cujos resultados orientassem, com maior segurança, os traba-lhos geológicos posteriores.

Com o intuito de fornecer alguns dêsses elementos, ainda praticamente omissos na literatura geológica nacional, elaborou-se o presente trabalho, que procura caracterizar o diamante do Triângulo Mineiro, através de sua morfologia, propriedades físicas e, especialmente, de suas inclusões minerais. Êstes dados poderão estabelecer, dentro de certos limites, as condições ambientes quando de sua formação, além de permitir a comparação dos diamantes de diversas áreas conhecidas.

1. HISTÓRICO E TRABALHOS ANTERIORES

As ocorrências de diamante, em Minas Gerais, são conhecidas desde o início do século XVIII (Reis, 1959), e os núcleos iniciais de exploração desenvolveram-se na região de Diamantina, ao N do Estado. A legislação mineira da época, forçava a exploração clandestina em grande escala e muitos garimpeiros, para fugirem à fiscalização, embrenhavam-se mais para o interior, surgindo, assim, novos centros de garimpo, a W do Rio São Francisco, na região do Triângulo Mineiro.

Nessa área, o diamante encontra-se disseminado numa extensão de aproximadamente 100.000 km^2 (Leonardos, 1956) e, talvez por essa razão, essas ocorrências não sejam tão conhecidas geológicamente, como na área de Diamantina. Contudo, mesmo assim, são inúmeros os estudos sôbre a geologia do diamante na região do Triângulo.

Derby (1882), estudando as ocorrências de Diamantina (São João da Chapada), relaciona os processos genéticos com rochas ácidas e extrapola essas considerações para os depósitos do Triângulo. No entanto, mais tarde (1898), sugere que as ocorrências de Água Suja (atual Romaria), e talvez os de Abaeté, possam ligar-se a eruptivas básicas. As jazidas de Água Suja já haviam sido anteriormente descritas por Campos (1891) e Hussak (1894).

Em 1906, Hussak tentou relacionar a origem do diamante, na região, com rochas de composição semelhante ao kimberlito: magnetita-piroxenito de Catalão (Goiás) e a rocha tufácea de Uberaba. Porém, desde que essas rochas são estéreis em diamante, deixou o problema em suspenso.

Rimann (1915, 1917 e 1931) descreveu a ocorrência de chaminés ultrabásicas do tipo kimberlítico, na Serra da Mata da Corda e em diversos pontos do Triângulo, acreditando serem as responsáveis pelo diamante do oeste de Minas Gerais, no que foi apoiado por Maack (1926 e 1932).

Guimarães (1931, 1932 e 1934), e Bôa Nova (1932), contes-taram as considerações de Rimann: as chaminés seriam, na realidade, lençóis de eruptivas básicas (rochas tufíticas e brechiformes), pobres em olivina e estéreis em diamante.

Freyberg (1932 e 1934), em estudo sobre a geologia e recursos minerais da região, confirmou as observações de Rimann e Maack, com relação às chaminés da Serra da Mata da Corda, e supôs que o magma se haja manifestado em diversos períodos. Em primeiro lugar, te-ríamos os derrames, no Triássico e, posteriormente, no Cretáceo, as erupções, com as quais estariam ligadas as chaminés.

Guimarães (1965), utilizando elementos já citados em trabalhos anteriores, classifica, de modo geral, as ocorrências diamantífe-ras brasileiras, dentro de seqüência metamórfica, como depósito de epizona. Considera improvável que os processos genéticos, na região do Triângulo, estejam ligados a magmatismo básico ou ultrabásico.

Como se vê, de 1934 até o presente, o panorama permanece essencialmente o mesmo.

Tabela 1

Coluna geológica geral (segundo Hasui, 1967)

Unidade Cronogeológica	Unidade Litoestratigráfica			Litologia e discordâncias	Ambiente
	Grupo	Formações	Membro		
Cenozóico				Areias inconsolidadas. Cascalhos, cangas limoníticas. Depósitos de lagoas.	Aluvial Eluvial Coluvial
Cretáceo	Neocretáceo	Bauru		discordância Arenitos e conglomerados e, subordinadamente, argilitos, folhelhos papiráceos, rochas silicosas e calcários	Fluvial
			Uberaba	discordância Arenitos a conglomerados e, subordinadamente, argilitos e siltitos vulcânicos.	Fluvial
				discordância Rochas alcalinas	
	Eocretáceo	São Bento e Mata da Corda	Serra Geral	Basaltos e arenitos intertrapeanos	Continental
			Patos	Derrames ultrabásicos e intercalações piroclásticas	
			Botucatu	Botucatu	Eólico
			Areado	Arenitos, siltitos, folhelhos pirobetuminosos	Fluvial
Pré-Cambriano (?)	BambuÍ Canastra Araxá			discordância Ardósias, metasiltitos, arcóseos, calcários, filitos e quartzitos. Itabiritos, xistos, gnaiss. Anfibolitos, granitos e pegmatitos	Geo-Sinclinal

O Complexo Cristalino aflora a NE e a SE do Triângulo (Grupo Araxá e Grupo Canastra), aparecendo, ainda, na região do alto Paranaíba (Grupo Araxá, Grupo Canastra e Grupo Bambuí). Sobre êle, depositam-se as formações Eocretáceas (Formação Botucatu e Formação Areado), recobertas por eruptivas básicas (Formação Serra Geral) e ultrabásicas (Formação Patos). Os sedimentos fluviais da Formação Uberaba e Grupo Bauru (Neocretáceos), foram precedidos de vulcanismo alcalino, responsáveis pelos distritos de Tapira, Araxá, Salitre, Serra Negra e o de Catalão (em Goiás). Depósitos aluviais, coluviais e eluviais, inconsistentes, representam, na região, o Cenozóico.

Fig. 2 - Mapa geológico do Triângulo Mineiro (segundo Hasui, 1967)

3. AMOSTRAGEM

A quase totalidade dos diamantes estudados foi adquirida de intermediários (compradores), em centros de comércio diamantário, o mais próximo possível dos garimpos: Araguari, Estrêla do Sul, Romaria, Monte Carmelo, Abadia dos Dourados, Coromandel, Patrocínio, Patos de Minas, São Gonçalo do Abaeté, Tiros, Cedro do Abaeté, Abaeté e Dôres do Indaiá. A aquisição direta, que seria ideal, para maior autenticidade da amostragem, é quase impraticável: o garimpeiro só se desfaz do seu material, após um grande número de ofertas. No entanto, toda a precaução foi tomada, com o intuito de não se contaminar o lote estudado, com diamantes de outras áreas diamantíferas mais distantes (Matto Grosso ou norte de Minas Gerais).

Desta forma, foi possível dispor de, aproximadamente, 230 amostras, todas elas do tipo industrial (diamantes com inclusões ou defeitos), e de peso variável entre 0,05 a 2,00 quilates métricos.

A Figura 3 mostra a distribuição do material estudado, levando-se em consideração o peso.

Fig. 3 - Características da amostragem

Além dos exemplares adquiridos, foi possível examinar cerca de 200 amostras de valor gemológico, durante as viagens efetuadas à região.

II. MÉTODOS DE ESTUDO

Na elaboração da parte experimental do presente trabalho, procurou-se, sempre que possível, aplicar métodos de estudo não destrutivos, com o objetivo de se preservarem as amostras, para trabalhos posteriores. Dentre estes métodos, tentou-se, inicialmente, utilizar a microscopia de raios X (microrradiografia), que elimina os inconvenientes da reflexão total, quando o diamante é examinado à lupa ou ao microscópio, por luz transmitida. A microrradiografia já foi aplicada com êxito, no estudo de precipitados em diamantes (Shah e Lang, 1959). No entanto, o processo utilizado, topografia de raios X (Lang, 1958), requer a preparação prévia da amostra, em lâmina delgada, sendo, portanto, semidestrutivo. Diante disto, procurou-se empregar outros processos de microrradiografia: contacto, projeção ou câmara obscura (Poen, 1955), que possibilitam a radiografia de amostras brutas. Porém, a grande transparência do diamante aos raios X, permitindo que a radiação difratada pelo cristal também impressione o filme, prejudica o contraste das radiografias, o que impediu, por enquanto, a aplicação deste método no presente estudo. Talvez, em amostras mais favoráveis, com faces planas e paralelas, a microrradiografia possa ser utilizada, com sucesso.

A goniometria de reflexão também foi tentada, no estudo morfológico do diamante, sendo utilizado o aparelho teodolítico, de dois círculos. As medidas dos ângulos diedros foram, no entanto, impraticáveis, pois com exceção da face de octaedro, as faces das demais formas se apresentam sempre arredondadas e irregulares, refletindo continuamente em grandes intervalos angulares.

1. MICROSCOPIA ÓPTICA

O exame óptico, à lupa ou ao microscópio polarizador, foi importante, principalmente no estudo morfológico e na observação de figuras e estruturas de superfície do diamante, sendo também aplicado como método auxiliar, nos trabalhos de identificação de suas inclusões.

A microscopia óptica, segundo a técnica convencional, re-

quer a preparação da amostra, em lâminas delgadas (para luz transmitida) ou secções polidas (para luz refletida), o que resulta na sua destruição parcial. Com o objetivo de realizar o estudo óptico, conservando-se os exemplares intactos, teve-se de, inicialmente, contornar o problema da reflexão total, provocada pelo alto índice de refração do diamante, o que se conseguiu examinando-se as amostras imersas em líquidos de alta refringência. Para isto, construiu-se um pequeno recipiente, colando-se um aro metálico de 0,5 mm de altura por 2,0 cm de diâmetro, sobre uma lâmina de vidro. Os líquidos inicialmente utilizados, como meio de imersão, foram o 1-monobromonaftaleno ($n = 1,658$) e o óleo de canela ($n = 1,600$). Porém, a instabilidade destes líquidos, levou a substituí-los por nujol ($n = 1,453$), sem grande prejuízo nas observações.

Outro artifício usado para melhorar as condições de estudo, foi adaptar o microscópio utilizado (Standard Universal Zeiss), de modo a obterem-se iluminação e contraste desejáveis, principalmente para a fotomicrografia. Tais condições foram conseguidas empregando-se luz convergente e deslocando-se a posição do condensador, tanto vertical como horizontalmente. Este procedimento permitiu utilizar os raios refletidos internamente no diamante, para melhorar a sua própria iluminação.

Com estes recursos, foi possível observar as inclusões, no interior do diamante, e obter informações sobre a sua morfologia, orientação, propriedades ópticas, bem como a sua influência nos cristais hospedeiros (fraturas de tensão e birrefringência anômala).

Os índices de refração das inclusões, utilizados para a sua perfeita identificação, foram determinados com o sacrifício de alguns exemplares de diamante. Os cristais incluídos, depois de destacados do hospedeiro e colados na extremidade de capilares de vidro, foram imersos em líquidos de refregência conhecida e, aplicando-se a técnica descrita por Rosenfeld (1950), determinaram-se todos os seus índices, utilizando-se sempre o mesmo cristal.

Nos diamantes cujas faces se apresentavam suficientemente planas e regulares, empregou-se a microscopia por luz refletida, no estudo de figuras e estruturas de superfície. Considerando-se, porém, a raridade destes casos, tal técnica foi pouco utilizada.

2. INTERFEROMETRIA

Aplicando-se a microscopia óptica, cujos recursos são limitados, não se pode distinguir, no plano de observação, pormenores com dimensões inferiores a $\lambda/2$, sendo λ o comprimento de onda da luz utilizada. No entanto, mesmo com meios ópticos, podemos observar desníveis nesse plano, da ordem de $10 \text{ \AA}$, ou seja, $\lambda/500$, para a luz verde da lâmpada de mercúrio (Tolansky, 1960). Estas medidas são possí-veis através de métodos interferométricos e a sua aplicação, na micro-topografia de superfícies polidas, é importante, no estudo do crescimen-to cristalino e na investigação de propriedades mecânicas (clivagem e dureza de abrasão ou endentação) de cristais ou ligas metálicas. Estudos dêste tipo foram realizados, para a interpretação do desenvolvimento das cavidades triangulares (trígonos), que ocorrem naturalmente, nas faces (111) do diamante. Muitas dessas figuras, assemelham-se a pirâmides negativas de base triangular, e os dados interferométricos permitiram o cálculo dos índices (hkl) das faces dessas pirâmides.

O método da interferometria utiliza o mesmo princípio que explica a formação de franjas de interferência, produzidas pela reflexão de raios luminosos, nas superfícies de películas finas. Desta forma, co-brindo-se a superfície de um cristal com uma lamínula de vidro, a pelí-cula de ar entre o cristal e a lamínula, desde que suficientemente fina, produzirá, ao microscópio e com luz monocromática refletida, franjas de interferência cuja configuração irá depender da superfície do cristal (su-põe-se que a lamínula seja perfeitamente plana e lisa). Esta figura é, na realidade, um verdadeiro mapa topográfico da superfície cristalina, sendo, a equidistância entre as curvas de nível, igual a $\lambda/2$.

A interpretação da microtopografia, a partir da figura inter-ferométrica é imediata, desde que se conheça o comprimento de onda da luz utilizada. Na Figura 4, por exemplo, a profundidade da cavidade A será igual a $2 \lambda/2$, ou seja, $0,59 \mu$, se foi empregada a luz amarela do sódio. Nessa mesma figura, verifica-se que pequenos desníveis, de fra-ção de $\lambda/2$, podem ser observados.

No presente estudo, aplicou-se um processo de interferome-tria relativamente recente (Nomarski e Weill, 1955), que utiliza a inter-ferência de duas imagens polarizadas, sendo uma tomada como plano de referência para outra. Êste processo não oferece a precisão de outros,

Fig.4 - Figura interferométrica da face (111) de um cristal de diamante (x 100)

como os descritos por Tolansky (1960), mas apresenta como vantagem, a facilidade da preparação da amostra, pois dispensa a cobertura do cristal com lamínulas e a prateação do conjunto, necessária para melhor reflexão.

A microtopografia do diamante foi realizada ao microscópio metalográfico (Reichert Metatest), com o interferômetro de polarização colocado entre o iluminador opaco e a objetiva. As duas imagens polarizadas são produzidas por um prisma duplo de quartzo, sendo cada um ligeiramente deslocado e inclinado em relação a outro. A formação da figura interferométrica se dá quando os polarizadores do microscópio estão cruzados. Para a obtenção de luz monocromática, usou-se filtro amarelo, com λ igual a $0,59\mu$.

3. DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X foi aplicada, em suas diversas modalidades, para a identificação das inclusões e dos satélites do diamante, através de suas constantes reticulares. Este método permitiu, igualmente, determinar a orientação das inclusões epitáxicas, em relação ao cristal hospedeiro, possibilitando, ainda, a caracterização dos geminados de diamante. Serão citados, a seguir, os processos empregados e os objetivos da sua aplicação.

a. Método de Laue

Os diagramas de Laue foram tomados na câmara de precessão, conservando-se μ igual a 0° (sendo μ o ângulo de precessão), e utilizando-se o foco pontual do tubo de Mo sob 35 kV e 20 mA. A vantagem deste procedimento reside no fato de poder-se trabalhar com pequenas distâncias entre o cristal e o filme, o que permite reduzir, para ape-

nas alguns minutos, o tempo de exposição. Este processo mostrou-se bastante eficiente na seleção de amostras interessantes, a serem submetidas a estudos posteriores, sendo também aplicado no exame de cristais geminados de diamante, quando os dados morfológicos foram insuficientes para o seu reconhecimento.

b. Método do pó

Os trabalhos de rotina, para a identificação de satélites e minerais associados, bem como de inclusões extraídas do hospedeiro, foram efetuadas por meio de diagramas de pó, obtidos com radiação $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), em câmara tipo Buerger, modificada por Camargo e Svise-ro (1966), cujo diâmetro de 28 mm exige curtos períodos de exposição. Em casos em que se necessitava maior precisão nas medidas dos d_{hkl} , utilizou-se a câmara de 114,6 mm de diâmetro, tomando-se as precauções citadas por Azaroff e Buerger (1959), para a correção dos erros sistemáticos.

Na identificação, comparou-se os d_{hkl} observados e as intensidades relativas das reflexões correspondentes, estimadas visualmente, com os padrões catalogados pelo fichário de diagramas de pó (X-ray Powder File ASTM, 1965).

c. Método da precessão

O método da precessão, divulgado por Buerger (1964), foi, dentre todos, o mais aplicado no presente estudo, pela sua eficiência e versatilidade, além de não requerer a destruição da amostra.

Como o método de Laue, a precessão se aplica a monocristais; porém, enquanto os lauegramas são projeções esféricas distorcidas (gnomônicas) e superpostas de níveis do retículo recíproco cristalino, os diagramas de precessão constituem a projeção retigráfica de somente um destes níveis e, conhecendo-se, a priori, a orientação do cristal com relação ao feixe incidente, a sua interpretação é imediata.

Para se conseguirem estes diagramas, utiliza-se a câmara de precessão e, segundo a técnica tradicional, o estudo da rede recíproca cristalina é efetuado tomando-se fotografias orientadas perpendicularmente aos eixos cristalográficos X, Y e Z, obtendo-se, desta forma, os diagramas dos níveis recíprocos $0kl$, $h0l$ e $hk0$ (níveis recíprocos de or-

dem zero), sendo necessários, para as fotografias dos níveis superiores ($1kl$, $2kl$, etc.), sucessivos ajustes na distância entre o cristal e o filme. As limitações inerentes ao método, que muitas vezes impedem a fotografia desses níveis, e a impossibilidade da orientação do cristal segundo uma das direções convencionais, levaram a aplicar, no presente trabalho, a técnica da "varredura" (Camargo e Leite, 1967), que consiste em orientar-se o cristal, de modo que uma direção recíproca qualquer $[uvw]^*$ coincida com o eixo de rotação do dial da câmara. Nesta posição, é possível fotografarem-se todos os níveis recíprocos que contêm a direção $[uvw]^*$, bastando, para isso, apenas girar o dial da câmara, na medida de um ângulo previamente calculado. Mesmo sem o auxílio de dados morfológicos, a técnica da "varredura" permite o estudo da rede recíproca de cristais e, por esta razão, mostrou-se muito eficiente no estudo das inclusões, no interior do diamante, quando é impraticável a orientação, segundo a morfologia. O cálculo do ângulo de giro do dial, necessário para a fotografia de um nível recíproco desejado, bem como o problema da orientação, foram tratados por meio de projeções estereográficas, em que se pode visualizar a relação de polaridade dos retículos cristalinos, direto e recíproco.

Antes da identificação sistemática das inclusões, organizou-se uma tabela das distâncias interplanares, presentes nos minerais incluídos em diamante: olivina, granada e cromita (Futergendler, 1958). Essas distâncias (Tabela 2, página seguinte) foram calculadas a partir das constantes cristalográficas desses minerais e, na relação dos d_{hkl} teóricos, excluíram-se os correspondentes a reflexões sistematicamente extintas, devido ao grupo espacial. Prepararam-se também, com antecedência, as projeções estereográficas dos minerais suspeitos, com o objetivo de interpretar-se, com maior segurança, os diagramas de precessão obtidos.

A identificação das inclusões foi efetuada pela comparação dos d_{hkl} observados com os constantes na Tabela 2, confrontando-se também as medidas angulares entre as direções recíprocas, determinadas nos diagramas de precessão, com os ângulos diedros desses minerais, obtidos nas projeções estereográficas, sobre o diagrama de Wulff. Esta operação permite determinar-se a natureza do cristal incluído com apenas uma fotografia, de um nível zero qualquer.

Tabela 2

Distâncias interplanares de inclusões de diamantes (até $d_{hkl} = 1,500 \text{ \AA}$)

a. Olivina

$$a_o = 4,76 - 4,82 \text{ \AA}$$

$$b_o = 10,20 - 10,48 \text{ \AA}$$

$$c_o = 5,99 - 6,10 \text{ \AA}$$

hkl	d_{hkl} (Å)	hkl	d_{hkl} (Å)	hkl	d_{hkl} (Å)
020	5,10 - 5,24	211	2,161 - 2,192	123	1,732 - 1,764
110	4,31 - 4,38	220	2,156 - 2,190	060	1,700 - 1,747
021	3,88 - 3,97	141	2,105 - 2,154	241	1,671 - 1,703
101	3,73 - 3,78	132	2,032 - 2,074	061	1,635 - 1,679
111	3,50 - 3,56	221	2,029 - 2,060	232	1,634 - 1,663
120	3,48 - 3,55	230	1,950 - 1,984	133	1,619 - 1,651
121	3,01 - 3,07	042	1,942 - 1,987	160	1,601 - 1,642
002	3,00 - 3,05	150	1,875 - 1,922	152	1,589 - 1,626
130	2,767 - 2,830	202	1,863 - 1,891	043	1,572 - 1,606
022	2,583 - 2,636	023	1,860 - 1,896	310	1,568 - 1,588
040	2,550 - 2,620	231	1,854 - 1,886	250	1,549 - 1,582
131	2,512 - 2,567	103	1,841 - 1,874	161	1,547 - 1,586
112	2,460 - 2,503	212	1,833 - 1,861	301	1,534 - 1,553
200	2,380 - 2,410	113	1,812 - 1,845	311	1,516 - 1,537
041	2,346 - 2,407	142	1,798 - 1,853	320	1,515 - 1,536
210	2,318 - 2,349	151	1,789 - 1,805	213	1,513 - 1,537
122	2,270 - 2,313	222	1,750 - 1,779		
140	2,248 - 2,302	240	1,740 - 1,774		

b. Granada

$$a_o = 11,52 - 12,06 \text{ \AA}$$

hkl	d_{hkl} (Å)	hkl	d_{hkl} (Å)
211	4,70 - 4,92	433	1,976 - 2,07
220	4,08 - 4,27	442	1,920 - 2,01
222	3,33 - 3,48	611	1,869 - 1,956
321	3,08 - 3,22	620	1,821 - 1,907
400	2,88 - 3,02	541	1,778 - 1,861
411	2,72 - 2,84	622	1,737 - 1,818
420	2,58 - 2,70	631	1,699 - 1,778
332	2,46 - 2,57	444	1,663 - 1,741
422	2,35 - 2,46	543	1,629 - 1,706
431	2,26 - 2,37	640	1,598 - 1,672
521	2,10 - 2,20	721	1,568 - 1,641
440	2,04 - 2,13	642	1,539 - 1,612

c. Cromita

$$a_o = 8,20 - 8,32 \text{ \AA}$$

hkl	d_{hkl} (Å)
111	4,73 - 4,83
220	2,90 - 2,96
311	2,47 - 2,52
222	2,37 - 2,41
400	2,05 - 2,09
331	1,881 - 1,918
422	1,674 - 1,706
333	1,578 - 1,609
511	1,578 - 1,609

Na prática, o estudo é realizado com o diamante, contendo a inclusão, inicialmente orientado ao acaso, na câmara de precessão. Utilizando-se radiação policromática de Mo e μ igual a 10° , obtêm-se fotografias de orientação, que revelam, além das reflexões do diamante (muito intensas), as da inclusão (menores e mais fracas) (Figura 5). Nestas fotografias, pode-se selecionar um nível recíproco de ordem zero da inclusão que, depois de orientado, pode ser fotografado sem distorções (Figura 6). Em nosso estudo, estes diagramas foram tomados com $\mu = 20^\circ$, utilizando-se o feixe pontual não filtrado do tubo de Mo.

Fig. 5 - Diagrama de precessão (foto para orientação) mostrando níveis recíprocos de ordem zero do diamante e da inclusão

Fig. 6 - Diagrama de precessão (foto final) mostrando o nível recíproco de ordem zero da inclusão

A orientação das inclusões epitáxicas pode também ser determinada na câmara de Buerger. Desde que os diagramas de precessão constituem projeções não distorcidas de um nível do retículo recíproco cristalino, é possível, através delas, determinar a orientação do cristal em estudo. Quando se fotografam diversos cristais simultaneamente - como é o caso de inclusões em diamantes - os diagramas obtidos podem apresentar a superposição dos níveis dos retículos recíprocos dos cristais, o que permite determinar a sua orientação mútua e, conseqüentemente, estabelecer qual ou quais os planos reticulares onde pode ocorrer o crescimento epitáxico.

A fim de se obterem diagramas de precessão suficientemente precisos, deve-se, primeiramente, orientar o diamante, de modo que sua direção $[111]$ ou $[110]$ coincida com o eixo de rotação do dial da câ

mara: esta orientação permite aplicar a técnica da "varredura" com a máxima eficácia. Obtemos, desta forma, diversas fotografias de precessão de níveis recíprocos de ordem zero do diamante, e, entre elas, selecionamos as que também apresentam níveis recíprocos de ordem zero da inclusão, o que somente ocorre se ambos os níveis são praticamente coincidentes, dentro de um limite de precisão de $\pm 3^\circ$.

A coincidência de níveis do retículo recíproco pode ser interpretada como coincidência de zonas do retículo direto, pois ambos os retículos são polares e, transportando-se para a projeção estereográfica estas zonas coincidentes, podemos rapidamente determinar os planos cristalográficos que permitem a epitaxia. Admitindo-se, segundo a maioria dos autores, que os planos de crescimento do diamante são paralelos à face do octaedro, somente estes planos poderão servir de suporte à epitaxia e a operação se simplifica, resumindo-se na determinação dos planos cristalográficos da inclusão coincidentes com o plano (111) do diamante. Isto feito, pode-se comprovar a epitaxia, através da verificação da coincidência dos nós reticulares nestes planos, observando-se a equivalência dos períodos de translação - $T[uvw]$ - em duas direções $[uvw]$ e o ângulo formado entre elas. Para maior rapidez de interpretação, foram preparadas, com antecedência, tabelas com as translações do diamante e das inclusões epitaxiais possíveis (Tabela 3), usando-se a expressão:

$$T[uvw] = a_o^2 \cdot u^2 + b_o^2 \cdot v^2 + c_o^2 \cdot w^2 + 2vwb_o c_o \cos \alpha + 2uwa_o c_o \cos \beta + 2uva_o b_o \cos \gamma$$

onde:

$a_o, b_o, c_o, \alpha, \beta$ e γ são as constantes da cela unitária e $[uvw]$ os índices da direção considerada, inferiores a 3.

Os ângulos entre essas direções podem ser obtidos graficamente, por meio de projeções estereográficas e sobre o diagrama de Wulff, ou, então, determinados pela relação (válida somente para sistemas ortogonais):

$$\cos [uvw] : [u'v'w'] = \frac{uu'a_o^2 + vv'b_o^2 + ww'c_o^2}{T[uvw] \cdot T[u'v'w']}$$

Tabela 3

Translações reticulares do diamante e inclusões (até u, v ou w = 3)

a. Diamante		b. Granada		c. Cromita	
$a_o = 3,5667 \text{ \AA}$		$a_o = 11,60 \text{ \AA}$		$a_o = 8,30 \text{ \AA}$	
[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)	[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)	[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)
100	3,57	100	11,60	100	8,30
110	5,04	110	16,40	110	11,74
111	6,18	111	20,09	111	14,38
210	7,97	210	25,94	210	18,59
211	8,74	211	28,41	211	20,33
221	10,69	221	34,80	221	24,90
310	11,28	310	36,68	310	26,24
311	11,83	311	38,48	311	27,53
320	12,96	320	41,83	320	29,93
321	13,34	321	43,41	321	31,06
322	14,71	322	47,83	322	34,22
331	15,55	331	50,56	331	36,18
332	16,72	332	54,40	332	38,93

d. Olivina

$a_o = 4,76 \text{ \AA}$

$b_o = 10,20 \text{ \AA}$

$c_o = 5,99 \text{ \AA}$

[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)
100	4,76
001	5,99
101	7,65
010	10,20
201	11,25
110	11,26
011	11,83
111	12,75
102	12,89
210	13,95
211	15,18
301	15,49
012	15,73
112	16,44
310	17,55
212	18,12

[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)
311	18,54
103	18,59
302	18,64
203	20,34
013	20,67
120	20,95
113	21,20
312	21,25
021	21,26
213	22,74
221	23,30
122	24,13
320	24,90
313	25,11
321	25,61
023	27,19

[uvw]	T[uvw]($\text{\AA}$)
123	27,60
322	27,63
223	28,82
323	30,71
130	30,97
031	31,18
131	31,54
230	32,05
231	32,59
132	33,20
232	34,21
331	34,30
032	34,35
133	35,80
233	35,83
332	36,73

4. ABSORÇÃO AO INFRAVERMELHO

A determinação das propriedades espectrográficas do diamante, verificadas pelo seu comportamento em relação à absorção de raios infravermelhos, teve, como objetivo, classificá-los de acordo com o tipo (tipo Ia, Ib, IIa ou IIb), o que permitiu estimar a frequência desses tipos nos diamantes provenientes do Triângulo. De outro lado, pôde-se ainda, comparar os espectros obtidos com outras propriedades estudadas: cor, morfologia, estruturas de superfície, presença de inclusões e defeitos de crescimento.

Normalmente, os espectros de absorção de infravermelho de sólidos, são efetuados com amostras pulverizadas e confeccionando-se pastilhas de KBr, como suporte. Com a finalidade de se conservarem as amostras para estudos futuros, não foi utilizada a técnica convencional, destrutiva, e os diagramas foram obtidos do material bruto, com um dispositivo especial para amostras microscópicas, adaptável ao aparelho Perkin Elmer 421.

5. FLUORESCÊNCIA

O exame dos diamantes, sob a lâmpada de quartzo, foi realizado com o objetivo análogo ao do estudo espectrográfico de absorção ao infravermelho. Dêste modo, compararam-se a presença, a intensidade e a cor da luminescência, com as propriedades já acima citadas. Neste estudo, utilizou-se como fonte de luz ultravioleta, o aparelho Mineralight, com λ igual a $3.660 \text{ \AA}$.

6. MÉTODOS QUÍMICOS

As análises químicas, por meios especiais, não foram aplicadas ao presente estudo, com exceção de somente uma, realizada com a microsonda de Castaing (electron micro-probe), a fim de se determinar a composição de inclusões negras e placóides, comuns em diamante. Nos trabalhos de rotina, limitou-se apenas aos ensaios, por via seca ou úmida, recomendados nos guias de mineralogia determinativa (Leinz e Souza Campos, 1968), para a identificação dos satélites e minerais associados.

III. GENERALIDADES SÔBRE O DIAMANTE

Um grande número de trabalhos científicos, versando sôbre as propriedades, composição, síntese, aplicação, ocorrência e origem do diamante, são constantemente publicados, e a razão dêste interesse reside no fato de tratar-se de substância ímpar, incomparável a qualquer um de seus sucedâneos, nesta ou naquela aplicação. A sua raridade, associada à durabilidade e às propriedades ópticas, lhe conferem valor gemológico inestimável, tendo, ainda, larga aplicação industrial, como material de corte e abrasivo.

Os primeiros mineralogistas e cristalógrafos se ocuparam da morfologia estranha do diamante, não observada em outro mineral e, a descoberta dos depósitos diamantíferos primários, nos fins do século passado, fêz com que a atenção dos estudiosos se voltasse para o problema da origem, datando dessa época, também, os primeiros ensaios de síntese. As bases teóricas para a produção artificial seriam, no entanto, estabelecidas somente anos mais tarde, e o início da produção em escala industrial do produto sintético, só foi possível recentemente.

Um outro problema que muito preocupou os pesquisadores antigos, referia-se ao seu caráter holoédrico ou hemiédrico, o que constitui até hoje problema aberto, mesmo depois de conhecida a sua estrutura cristalina, determinada em 1913. De outro lado, grande progresso no estudo de suas propriedades, sentiu-se após a publicação do trabalho de Robertson, Fox e Martin (1934), quando os diamantes foram classificados em dois tipos distintos. Nas décadas de 40 e 50, físicos da escola hindu e da escola inglesa tentaram interpretar a existência dêsses tipos, através de estruturas teóricas, deduzidas com base em suas propriedades espectrográficas. Somente em 1959, porém, conseguiu-se relacionar os diversos tipos observados e as respectivas propriedades características, com a presença de impurezas, principalmente do nitrogênio (Kaiser e Bond, 1959). O trabalho dos cristalógrafos e geólogos atuais é, não só a obtenção de diamantes sintéticos com propriedades prefixadas e a baixo custo, como o estabelecimento definitivo das condições de origem, para que novas jazidas sejam localizadas.

1. CRISTALOGRAFIA

Sob o ponto-de-vista morfológico, os cristais de diamante raramente externam a relativa simplicidade de sua estrutura. A natureza de suas formas peculiares, apresentando faces arredondadas e arestas curvas, será ainda, objeto de muitos estudos futuros. As formas cristalográficas tidas como seguramente observadas, segundo Goldschmidt (1916): $\{100\}$, $\{110\}$, $\{111\}$, $\{211\}$, $\{322\}$, $\{331\}$, $\{552\}$ e $\{332\}$, eram consideradas hemiédricas, em virtude de sua simetria inferior, revelada por estrias sobre as faces dos cristais (Fersman e Goldschmidt, 1911). Após a determinação da estrutura do diamante, quando a simetria holoédrica foi verificada nos diagramas de difração de raios X, poucos autores (Beckenkamp, 1926) continuaram a admitir a hemiedria.

No que diz respeito à natureza das faces arredondadas, Fersman e Goldschmidt (1911) foram talvez os primeiros a suspeitar da dissolução natural, como responsável pelo seu desenvolvimento, no que foram severamente criticados por Williams (1932), que admitiu serem resultantes de crescimento (faces vicinais). Atualmente, os autores se dividem, apoiando esta ou aquela interpretação, existindo, ainda, os que consideram a origem híbrida, ou seja, crescimento e dissolução.

O diamante apresenta estrutura característica, bem conhecida (Bragg e Bragg, 1913), que pode ser interpretada como a interpenetração de dois retículos cúbicos, A e B, centrados nas faces (Figura 7), estando, a origem de A em (0, 0, 0) e de B em (1/4, 1/4, 1/4).

Fig. 7 - Estrutura do diamante

Os tetraedros dos retículos A e B acham-se opostamente orientados, decorrendo, disto, a simetria holoédrica do conjunto (grupo espacial $Fd3m$). A simetria pontual da cela unitária é, no entanto, hemiédrica. O parâmetro unitário, a_0 , obtido de cristais individuais, é variável: $3,55970 \pm 20 \text{ kX}$ (Bijvoet, 1951).

2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O mais puro dos diamantes ainda pode apresentar 0,001% de impurezas, e as pedras de boa qualidade contêm, em média, 99,9% de carbono (Seal, 1968). Entre as impurezas, a mais importante é o nitrogênio, que ocorre em teores de até 0,25% (Kaiser e Bond, 1959), e a sua influência, sobre as propriedades físicas, é tal modo importante, que constitui a base da moderna classificação do diamante, segundo os tipos Ia, Ib, IIa e IIb.

Desde 1934, admite-se a existência de dois tipos fundamentais (tipos I e II), com diferente comportamento físico (Robertson, Fox e Martin), o que se explica, atualmente, pela presença de nitrogênio nos diamantes do tipo I. A princípio, julgou-se que esta impureza se encontrasse na forma de átomos substitucionais isolados e, assim sendo, tais diamantes deveriam apresentar ressonância eletro-paramagnética (E.P.R.), devida à diferença de valência do carbono e nitrogênio. Verificou-se, no entanto (Smith et al., 1959), que os diamantes, mesmo contendo altas concentrações de nitrogênio, não apresentavam essa propriedade, concluindo-se, então (Elliot, 1960), que os átomos de nitrogênio deveriam estar segregados, concentrando-se em plaquetas, posteriormente verificadas, através da microscopia eletrônica (Evans e Phaal, 1962). A presença de difração anômala de raios X por diamantes deste tipo já havia sido anteriormente observada por Wooster e Hoerni (1955) e Caticha-Ellis e Cochran (1958). Alguns cristais de diamante, porém, podem apresentar nitrogênio em centros paramagnéticos, o que indica que a impureza está sob a forma substitucional. Deste modo, os diamantes do tipo I foram classificados em Ia, com plaquetas de nitrogênio, e Ib, mais raros, com nitrogênio substitucional.

De maneira análoga, os diamantes do tipo II foram subdivididos (Custers, 1952) em dois grupos: tipo IIa, teoricamente puros, e tipo IIb, cujas impurezas (Al ou talvez B ou Be), lhe conferem características semicondutoras.

Além do nitrogênio, muitas impurezas podem ocorrer como elementos menores (Chesley, 1942; Raal, 1957): Si, Al, Ca e Mg; mais raramente, Fe, Ti e Cu, podendo ainda existir traços de Ag, Cr, Na, Ba, Sr e Pb. Estas impurezas, aparentemente, não se relacionam com o tipo do diamante, podendo ocorrer nos diamantes do tipo II como nos do tipo I (Bunting e Van Valkenburg, 1958).

3. PROPRIEDADES FÍSICAS

Considerando-se o diamante estruturalmente perfeito e constituído apenas por átomos de carbono, fortemente unidos entre si, por ligações direcionais covalentes, podem-se prever algumas de suas propriedades físicas teóricas. Os diamantes naturais e sintéticos, no entanto, apresentam comportamento físico anômalo, explicado como consequência de defeitos estruturais (vacâncias, átomos intersticiais, deslocamentos, etc.), muitos deles provocados pela presença de impurezas. Artificialmente, é possível introduzirem-se defeitos análogos, no retículo cristalino do diamante, através do bombardeamento com nêutrons, elétrons, raios X ou raios gama, que pode acarretar o deslocamento dos átomos de carbono, produzindo-se, assim, vacâncias e átomos intersticiais.

Entre as até agora observadas, as propriedades ópticas são as mais intensamente afetadas por estes defeitos estruturais, admitindo-se ser o nitrogênio o principal responsável pelas anomalias verificadas nos espectros ópticos de absorção ou emissão. Desta forma, os diamantes do tipo Ia e Ib absorvem as radiações ultravioletas de comprimento de onda inferiores a $3.000 \text{ \AA}$ (4 eV), enquanto os do tipo IIa e IIb são transparentes, até o limite inferior de $2.300 \text{ \AA}$ (5,4 eV). Do mesmo modo, os do tipo Ia e Ib apresentam um sistema de bandas de absorção à radiação infravermelha, no intervalo de $7,5$ a $9,0 \mu$, o que não se observa nos diamantes do tipo IIa e IIb. Podem-se distinguir os tipos Ia e Ib, pela intensidade relativa dessas bandas. Diamantes de todos os tipos absorvem na região de 3 a 6μ ; no entanto, somente os do tipo IIb apresentam picos de absorção anômalos, dentro desse intervalo. Além disso, estes diamantes são comumente azulados (Premier Blues), mostrando, ainda, picos de absorção muito pronunciados, na região do visível.

A fluorescência - azul, verde ou amarela - é observada, geralmente, nos diamantes do tipo I, quando submetidos à radiação ultravioleta, sendo freqüente o padrão geométrico da distribuição desta fluorescência, o que é explicado pelo zoneamento de camadas com diferente natureza, durante o crescimento. Os diamantes do tipo IIb são normalmente fosforescentes.

Outra propriedade óptica importante, conhecida desde o século passado, é a birrefringência anômala, atualmente admitida como fenômeno de piezobirrefringência (Pointdexter, 1955). O diamante torna-se birrefringente, uniaxial ou biaxial negativo, quando submetido a pressões dirigidas, dependendo, o caráter óptico, da direção na qual a força é aplicada. O dia-

mante com inclusões frequentemente exibe esta anomalia e a tensão interna, responsável pela birrefringência, é devida aos diferentes coeficientes de dilatação do diamante e do cristal incluído. Este fenômeno indica, seguramente, que a inclusão é contemporânea ou preformada. Muitos diamantes, ou mesmo a totalidade, como admite Tolansky (1966), apresentam birrefringência anômala causada por outros fatores, que não as inclusões. Este comportamento anômalo levou Friedel (1932) a admitir uma fase paramórfica do diamante (β), estável acima de 1885°C (à pressão ambiente), quando se verifica uma alteração nos padrões da birrefringência. Segundo Friedel, as tensões internas seriam originadas pela transformação paramórfica de beta para alfa (forma estável à temperatura e pressão ambientes), com alteração de volume. Tolansky (1966) admite o intercrescimento de diversos tipos de diamante (I e II), como a causa das tensões internas.

Assim como o comportamento óptico, as propriedades mecânicas do diamante estão intimamente relacionadas com a presença de nitrogênio. Os diamantes estruturalmente menos perfeitos (tipo I) apresentam dureza maior, pois os seus defeitos cristalinos aumentam a energia interna do retículo, como acontece nas ligas metálicas. A clivagem, neste caso, é mais difícil, e a sua superfície não apresenta a regularidade observada no tipo II. Ambos os tipos apresentam variações, na dureza de abrasão (Kraus e Slawson, 1939), sendo menor nas direções paralelas aos eixos cristalográficos X, Y e Z. Deste modo, a face (100) apresenta durezas maiores ao longo das diagonais, enquanto que nos planos (110), isto se verifica somente ao longo da diagonal menor. Na face de octaedro não existem direções paralelas a X, Y e Z e, neste plano, as direções de menor resistência à abrasão (do centro da face para as arestas), apresentam dureza maior que as observadas ao longo da diagonal da face do cubo ou do rombododecaedro. A variação desta propriedade, nas três direções, não pode ser representada por uma superfície contínua, como no caso da indicatriz óptica (Dennig, 1953).

Com relação ao peso específico, variável entre $3,51477$ e $3,52554 \text{ g/cm}^3$, a 25°C (Mikokajevsky et al., 1964), os diamantes do tipo I são mais densos, o que indica presença de impurezas com peso atômico maior do que o do carbono, confirmando, portanto, a ocorrência de nitrogênio, nestes cristais.

4. VARIEDADES

A literatura mineralógica cita, ao lado do diamante comum, a ocorrência de diversas formas imperfeitas, constituídas por agregados policristalinos. Comumente, são denominados borte, carbonado, etc., mas a terminologia, ainda obscura e utilizada arbitrariamente, é aplicada também às variedades de diamante inadequadas à lapidação.

Williams (1932) cita, como variedades mais comuns, o borte, a stewartita, a framesita, a bala e o granizo. No Brasil, empregamos o termo carbonado, para designar uma variedade com as mesmas características do borte, descrito por Williams: agregado policristalino, de granulação variável, entre fânero e criptocristalina; coloração escura, de cinza a preta; alto teor de impurezas (10% em média) e baixa densidade (aproximadamente 3,48). O mesmo termo é, entre nós, aplicado para o monocrystal de diamante negro, originado, possivelmente, pela grafitização parcial (Friedel, 1932). As outras variedades (framesita, stewartita e bala), apresentam, em linhas gerais, as mesmas propriedades do borte ou carbonado. A framesita deles se distingue apenas pela granulação mais fina, e pelo brilho, tendendo ao vítreo, em algumas regiões. A stewartita é a variedade de borte magnético, o que se deve às inclusões de magnetita. A bala é o borte de tom cinza-metálico, com forma arredondada. O caráter fibrorradiado, admitido para explicar a forma esférica desta última variedade, não foi observado em secções polidas (Fischer, 1961).

A alta dureza de abrasão, apresentada por estas variedades, é consequência da descontinuidade dos planos de clivagem, entre os diversos grânulos que constituem o agregado.

O granizo, como o diamante negro, parece não apresentar natureza policristalina e suas características são totalmente diversas das do borte ou carbonado. Distingue-se do diamante comum, por ser opaco e apresentar níveis de crescimento com coloração cinza de tons diferentes. A sua morfologia, dureza e densidade, são comparáveis às do diamante puro, apresentando, no entanto, cerca de 2% de seu peso, no resíduo de combustão.

As variedades policristalinas de diamante podem ser consideradas como geminados múltiplos e complexos, de difícil interpretação, como admite Slawson (1950).

5. OCORRÊNCIA

O diamante é explorado, desde a antiguidade, em depósitos aluvionares e, somente nos fins do século passado, se teve notícia de sua ocorrência primária, em Kimberley (África do Sul). Nestes depósitos, o diamante ocorre em condutos vulcânicos ultrabásicos (40% de SiO_2), denominados kimberlitos, constituídos de rochas peridotíticas, tufáceas ou brechiformes, parcialmente serpentinizadas, contendo olivina, apatita, perowskita, ilmenita, cromita, enstatita, granada e diopsídio.

Atualmente, admite-se que tais rochas sejam a matriz primária do diamante ou, pelo menos, o meio de transporte dos cristais já formados, para regiões mais superficiais da crosta.

Ocorrências de diamante, ligadas a magmatismo menos básico, são descritas no dolerito de Oakey Creek (Austrália) e no augita-andesito de Holsdam (África do Sul).

Após a descoberta de Kimberley, tentou-se localizar as possíveis matrizes, nas regiões onde se encontravam diamantes aluvionares. No Brasil, essas buscas foram infrutíferas, sendo, no entanto, bem sucedidas na Rússia, onde se encontraram diamantes em chaminés, do tipo kimberlítico (Urais e Yakutia), e na Índia, onde os depósitos aluvionares parecem ligar-se a condutos vulcânicos ultramáficos, em Panna (Mathur, 1962). Chaminés de kimberlito diamantífero são ainda encontradas nos E. U. A. (Piky County, Arkansas). Em várias localidades da África (Serra Leoa, Tangânicca e Congo), admite-se que o diamante se relacione com rochas kimberlíticas.

São também citadas ocorrências de cristais diminutos ($100 \text{ \AA}$), em meteoritos (condritos), em concentrações de até 0,3% (Urey et al., 1957).

6. SÍNTESE

A produção artificial do diamante, desde há muito, interessou aventureiros de todo o mundo, mas os primeiros ensaios realizados com algum rigor científico, e cujos resultados são hoje postos em dúvida, foram empreendidos por Hanay (1880) e Moissan (1894), submetendo compostos de carbono a altas pressões e a altas temperaturas. As primeiras tentativas bem sucedidas, no entanto, foram obtidas em 1955, pela General Electric

(E.U.A.), ASEA (Suécia) e De Beers (África do Sul), após o perfeito estabelecimento do diagrama de equilíbrio grafita-diamante (Rossini et al., 1952).

Este diagrama, modificado por Berman (1964), nos mostra que o diamante é estável, à temperatura ambiente (298°K), acima de 16,1 ktm, exigindo pressões muito maiores, a temperaturas mais elevadas. A transformação direta grafita-diamante é, porém, possível. somente a pressões ou temperaturas elevadíssimas (300 ktm ou 4.000°C), razão pela qual se utilizam catalisadores metálicos, no processo de síntese. O mecanismo de formação seria, neste caso, um pouco mais complexo: a grafita dissolve-se no metal fundido, sob a forma de carbono atômico e o diamante começa a cristalizar-se quando as condições de pressão e temperatura se situam na sua região de estabilidade, formando-se grafita abaixo da curva de equilíbrio (Simon, 1968b).

Fig. 8 - Diagrama de equilíbrio grafita-diamante

Os limites do domínio de formação do diamante, são, dêste modo, constituídos pela própria curva de estabilidade grafita-diamante e a linha de fusão do metal (Fe, Ni, Nícrômio, Inconel, Ni-Ge, etc.), ou do eutético, se fôr o caso.

Recentemente, tentaram-se outros meios de síntese, fora da região de estabilidade do diamante, a baixas pressões e a baixas temperaturas. O mecanismo de desenvolvimento, nestes processos, poderia ser explicado através da cinética de formação (Simon, 1968b).

IV. MORFOLOGIA

A morfologia do diamante do Triângulo Mineiro tem sido estudada somente em gemas de porte descomunal, provenientes dos garimpos de Coromandel e Estrêla do Sul. No entanto, os resultados desses estudos não podem ser considerados representativos, devido ao caráter verdadeiramente anômalo de tais amostras, todas elas ultrapassando 100 quilates métricos, em peso.

A primeira destas pedras, "Estrêla do Sul" (254 quilates métricos), foi encontrada em 1853, no Rio Bagagem e parecia tratar-se de um diamante naturalmente clivado, apresentando ainda faces curvas de hexatetraedro ou rombododecaedro, o que se pode deduzir através de desenhos atribuídos a Duffrénoy (Reis, 1959).

Em 1938, Barbosa descreveu o "Minas Gerais" (172,5 quilates métricos), concluindo ser o octaedro a forma dominante, o que se deve, talvez, à clivagem natural, pois a face (111), em diamantes muito desenvolvidos, raramente deve ocorrer.

Leinz (1939), estudou o "Presidente Vargas" (770 quilates métricos), o quinto, na relação mundial dos grandes diamantes, tendo encontrado, além dos planos de clivagem, faces curvas e irregulares do rombododecaedro.

O diamante "Darcy Vargas" (460 quilates métricos), segundo Leonardos e Saldanha (1939), apresentava planos de octaedro e faces menos desenvolvidas de cubo, rombododecaedro e tritetraedro. As faces (111) foram caracterizadas, pelos autores, por meio de figuras de contorno triangular indefinido; entretanto, pela fotomicrografia publicada no trabalho, pode-se considerar que tais planos devem ser do tipo hexatetraédrico, fortemente abaulados. O mesmo deve ocorrer com o diamante "Coromandel" (400,65 quilates métricos) (Saldanha, 1941), onde o hábito octaédrico é resultante da associação de cinco planos de clivagem e duas faces (111) naturais, porém recurvadas. No mesmo trabalho, o autor ainda ressalta a frequência de diamantes perfeitamente octaédricos que ocorrem em Piuí (extremo SE do Triângulo), não esclarecendo, contudo, o tamanho das amostras.

Fato interessante é a proveniência comum destes diamantes, to dos êles encontrados no Rio Santo Antônio das Minas Vermelhas, afluente do Paranaíba (Município de Coromandel, MG).

Outros grandes diamantes, "Governador Valadares" (Saldanha, 1942); "Independência" e outros (Reis, 1959), apresentavam as mesmas ca racterísticas gerais dos diamantes acima descritos: ausência de faces planas naturais, ocorrendo, em seu lugar, formas indefinidas, com arestas e faces curvas e irregulares, o que torna a orientação morfológica possível sòmente pelos planos de clivagem, quase sempre presentes.

As amostras de menor porte podem apresentar, entretanto, a predominância de um hábito definido, o que permite classificá-las, sob o ponto-de-vista morfológico, e, daí, estimar a freqüência dos diversos hábitos, entre os diamantes do Triângulo Mineiro. Tal estudo, aparentemente simples, é dificultado pela ocorrência de faces curvas, comuns em diamante, que impossibilitam o perfeito reconhecimento das formas cristalográficas presentes. Muitos autores a elas se referem, através dos seus índices, mas a insegurança deste procedimento pode ser verificada pela total ineficiência dos dados goniométricos, necessários para a sua determinação. Por este motivo, será evitada, na descrição das formas observadas, a nota segundo o índice, com exceção das formas $\{111\}$, $\{110\}$ e $\{100\}$, que parecem as únicas originadas por fenômenos de crescimento cristalino, podendo, neste caso, apresentar faces planas. A terminologia adotada na descrição das demais formas cristalográficas, refere-se ao hábito do cristal, o que pode não concordar com a nomenclatura convencional, utilizada para designar as formas simples, com relação à classe de simetria à qual pertencem. Serão empregados, deste modo, os termos octaedro e trioctaedro, correspondentes a formas holoédricas, ao lado de hexatetraedro, que se refere a uma forma hemiédrica.

A classificação adotada, com a finalidade de sistematizar o estudo das formas presentes, considera, de início, quatro tipos característicos: formas simples, formas combinadas, formas irregulares, e geminados, facilmente identificáveis nos diamantes do Triângulo. Os hábitos cristalin^{os} observados e que serão descritos a seguir, podem incluir-se dentro de um destes tipos. Em alguns casos, no entanto, esta classificação pode assumir caráter subjetivo, em virtude da ocorrência de hábitos intermed^{ios}.

1. FORMAS SIMPLES

Entre os diamantes que apresentam formas simples, pode-se distinguir, à primeira vista a predominância do hábito octaédrico ou rombododecaédrico, sendo raramente verificado o desenvolvimento do hábito cúbico. As características e variações de cada um, serão tratadas separadamente.

a. Hábito octaédrico

Considerando que o desenvolvimento do diamante se efetua pelo empilhamento de planos (111), como é admitido pela maioria dos autores, o octaedro seria a forma de equilíbrio, durante o crescimento do cristal. No entanto, cristais octaédricos perfeitos, apresentando vértices e arestas bem delineados, não foram encontrados entre as amostras estudadas, excluindo-se, no caso, os sólidos de clivagem. A face (111) ocorre frequentemente e a sua superfície, plana e regular não é observada em nenhuma outra forma; porém, está sempre associada a faces arredondadas de rombo-dodecaedro ou hexatetraedro, que substituem os vértices e arestas do octaedro (Figura 9).

Fig. 9 - Octaedro com arestas arredondadas

Fig. 10 - Octaedro com arestas reentrantes

É também comum, nos diamantes do Triângulo, o cristal de hábito octaédrico, com arestas e vértices reentrantes (Figura 10), originado pelo crescimento de dois ou mais indivíduos paralelos. Vários autores interpretam estas formas como resultantes de geminção, segundo (100) ou [100] (geminado de Mohs), o que é possível admitir, considerando a simetria hemiédrica do cristal. O desenvolvimento do hábito tetraédrico de dois indivíduos, encontrado num só exemplar (Figura 11), sugere, a princípio, esta interpretação. Frequentemente, observam-se, em cristais deste tipo,

a substituição dos vértices e arestas por faces curvas, resultando numa forma semelhante à descrita por Valarelli (1963) (Figura 12).

Fig. 11 - Geminado de Mohs

Fig. 12 - Geminado de Mohs
com arestas arredondadas

Os tipos intermediários, nos diamantes de hábito octaédrico, situam-se entre o octaedro quase perfeito, com arestas e vértices pouco arredondados (Figura 9), e as formas combinadas de octaedro e rombododecaedro (Figura 24). Pode-se considerar ainda o meio-térmo entre o agregado de vários indivíduos paralelos (Figura 13) e a forma combinada, apresentando faces de cubo, octaedro e rombododecaedro (Figura 25). Quando ocorre o arredondamento das arestas e vértices nestes cristais, pode-se notar o início do desenvolvimento do hábito trioctaédrico (Figura 17).

Fig. 13 - Agregado paralelo de vários octaedros

Fig. 14 - Octaedro tabular, com arestas arredondadas

Além dos diamantes octaédricos equidimensionais, é possível encontrarem-se octaedros com hábito tabular, segundo (111) (Figura 14). Observaram-se, ainda, cristais alongados na direção [110]; parecem, porém sólidos de clivagem.

b. Hábito rombododecaédrico

A forma rombododecaédrica é a mais comum entre as observadas, em decorrência do grande número de variantes que pode apresentar, não havendo, contudo, limite nítido entre elas. Pode-se, no entanto, distinguir a predominância de três formas, tôdas elas mostrando faces arredondadas e arestas curvas: o rombododecaedro propriamente dito, o hexatetraedro e o trioctaedro.

Os diamantes perfeitamente rombododecaédricos são raros, e as faces (110), nestes cristais, podem-se apresentar extremamente lisas, como se fôsem artificialmente polidas, notando-se, em alguns casos, ligeiro sulco, ao longo de sua diagonal maior (Figura 15). Em outros, êstes planos são estriados, nesta mesma direção, o que lhes confere hábito semelhante ao trioctaedro (Figura 17). Nestas duas variantes, pode-se verificar, e é comum, o desenvolvimento de arestas sinuosas, pouco salientes e irregulares, na direção da diagonal menor das faces (110). Quando tais arestas se mostram mais perfeitas e pronunciadas, a forma resultante exibe hábito nitidamente hexatetraédrico (Figura 16), que, em alguns casos, faz lembrar o cubo piramidado, pelo igual desenvolvimento nas direções [111], o que se observa nas variedades opacas de diamante.

Fig. 15 - Rombododecaedro, com faces arredondadas

Fig. 16 - Hexatetraedro, com faces arredondadas

Não se verificam, nas formas trioctaédricas, a presença das arestas do octaedro, que aqui são substituídos por faces do tipo (110), fortemente recurvadas (Figura 17). É possível, também, nestas amostras, observarem-se as arestas sinuosas e os sulcos já citados na face de rombododecaedro e, na medida em que êstes elementos melhor se definem, o conjunto pode tomar o aspecto do hexaoctaedro (Figura 18).

Fig. 17 - Trioctaedro,
com faces ar-
redondadas

Fig. 18 - Hexaoctaedro,
com faces ar-
redondadas

Fig. 19 - Rombodode-
caedro along-
gado

Fig. 20 - Hexatetraedro
tabular

Fig. 21 - Trioctaedro
tabular

Fig. 22 - Trioctaedro
achatado, se-
gundo um E_2

Entre os diamantes rombododecaédricos característicos, é comum a ocorrência de amostras alongadas numa das direções $[111]$, decorrendo, disto, o hábito prismático dêesses cristais (Figura 19). Nos diamantes hexatetraédricos já se observa, com frequência, o hábito tabular, segundo (111) (Figura 20), que também pode ser encontrado em cristais do tipo trioctaédrico (Figura 21). O maior desenvolvimento de duas faces paralelas, neste último tipo, pode originar uma forma achatada, segundo um dos eixos de simetria binária (Figura 22).

c. Hábito cúbico

Os cristais cúbicos ocorrem somente em variedades translúcidas ou opacas de diamante, e suas faces, apesar de planas, apresentam-se corvoadas irregularmente. Este hábito é raramente observado e, em vista disto, as características aqui descritas podem não ser representativas. Entretanto, nas poucas amostras cúbicas encontradas, nota-se, como no octaedro, a substituição das arestas e vértices por faces arredondadas e irregulares de rombododecaedro ou hexateraedro (Figura 23). O hábito cúbico, nestes cristais, é equidimensional, verificando-se, em apenas um indivíduo, ligeiro achatamento segundo (111) , o que lhe conferia hábito romboédrico.

2. FORMAS COMBINADAS

Há cristais de diamante em que se pode observar a combinação de mais de um dos hábitos citados, sendo mais frequentes os que apresentam faces planas de octaedro. Estes cristais mostram, além da forma $\{111\}$, faces arredondadas de formas rombododecaédricas (Figura 24).

Nos cristais cúbicos, quando os vértices e arestas se tornam mais arredondados, verifica-se, também, o desenvolvimento do hábito rombododecaédrico (Figura 23).

Podem-se, no entanto, considerar como formas combinadas autênticas, apenas as que apresentam a associação de $\{111\}$, $\{110\}$ e $\{100\}$, ou ainda, $\{111\}$ e $\{100\}$. São raramente encontradas, e talvez sejam as únicas combinações originadas por crescimento cristalino. Neste caso, as faces (110) e (100) apresentam-se planas, verificando-se a presença de estrias paralelas e bem definidas, ao longo da diagonal maior da face de rombododecaedro. A forma combinada de $\{111\}$ - $\{110\}$ - $\{100\}$ (Figura 25)

Fig. 23 - Cubo com arestas arredondadas (combinado de cubo e rombo-dodecaedro)

Fig. 24 - Combinado de octaedro e rombo-dodecaedro

Fig. 25 - Combinado $\{111\}$ - $\{110\}$ - $\{100\}$

Fig. 26 - Combinado $\{111\}$ - $\{hhl\}$

ocorre geralmente em cristais translúcidos, denominados "cascudos", pelos garimpeiros, e a associação de $\{111\}$ e $\{100\}$ foi observada em apenas um exemplar incolor de extrema limpidez.

São encontrados, também, cristais apresentando a combinação de $\{111\}$ e $\{hhl\}$, com faces planas e estriadas. As medidas goniométricas, no entanto, são inseguras para a perfeita caracterização desta última forma (Figura 26).

3. FORMAS IRREGULARES

Muitos diamantes, principalmente os maiores, não apresentam hábito definido, desenvolvendo-se ou achatados, ou alongados, ou irregularmente, sendo difícil a sua orientação. Apesar da grande semelhança com

os cristais de hábito rombododecaédrico, a sua irregularidade morfológica não permite classificá-los em nenhum dos tipos precedentes. Nestas amostras, não se observam faces planas e os cristais são limitados por superfícies curvas do tipo rombododecaédrico. Por vezes, estes planos mostram-se tão recurvados, que não se podem notar as arestas formadas por eles.

Algumas destas formas são vulgarmente designadas por "lascas" ou "lascados". Podem-se incluir entre os diamantes do tipo irregular, os sólidos de clivagem, em que a morfologia original é inacessível, e é o caso de muitos dos grandes diamantes citados na literatura.

4. GEMINADOS

Pode-se considerar os geminados como resultantes de acidentes, durante o crescimento cristalino (Simon, 1968a), ocorrendo isto em virtude da pequena diferença da energia de adesão, na configuração normal ou na de geminação. Há autores (Buerger, 1945) que admitem, no limite entre dois indivíduos geminados, uma estrutura polimórfica possível. Tal acontece com a blenda (ZnS cúbico), onde dois cristais geminados segundo [111] têm, no contacto, a estrutura da wurtzita (ZnS hexagonal).

No diamante, o empilhamento se faz em camadas de tetraedros, paralelas a (111), e a geminação é verificada quando estes tetraedros se unem ao substrato, a 60° da posição normal. Segundo Slawson (1950), quando o acoplamento se dá na posição intermediária, a 30° , o tetraedro gira para a posição de empilhamento normal, e a neutralidade deve ocorrer somente a 10 ou 15° da posição de geminação, pois a energia superficial é influenciada pelo arranjo das camadas inferiores. Abaixo deste limite, o tetraedro gira para a posição de 60° , podendo originar um segundo indivíduo cristalino. Sendo este fenómeno frequente, na cristalização do diamante, pode-se admitir que, em escala submicroscópica ou mesmo microscópica, todos os diamantes devem apresentar áreas ou regiões geminadas (Slawson, 1950). A camada entre dois indivíduos, neste caso, apresenta simetria hexagonal, e a existência dessa fase polimórfica do diamante, com estrutura semelhante à da wurtzita (Ergun e Alexander, 1967), vem apoiar a suposição de Buerger (1945).

Adotando-se a interpretação geométrica, os geminados deste tipo, definidos através de seus elementos de geminação, têm (111) como

plano de composição original e plano de geminação, sendo $[111]$ o eixo de geminação. Em tôdas as amostras observadas, verificou-se obediência a esta condição (lei do espinélio), notando-se sômente a variação da morfologia externa dos geminados, cuja descrição poderá ser mais um elemento a caracterizar o diamante do Triângulo Mineiro.

Em geral, sob o ponto-de-vista morfológico, os geminados de diamante tem forma indefinida, podendo ser fâcilmente confundidos com os cristais simples, de forma irregular. Dêles distinguem-se, no entanto, pela presença de "suturas" ou "costuras", observadas no contacto dos dois indivíduos. Nos casos de difícil caracterização morfológica, os geminados podem ser reconhecidos, através de diagramas de difração de raios X (método de Laue ou precessão), que revelam a simetria senária, causada pela superposição de dois cristais mütuamente girados 60° (Figuras 27 e 28).

Fig. 27 - Lauegrama de geminado segundo (111)

Fig. 28 - Diagrama de precessão de geminado segundo (111)

Entre os geminados com formas definidas, os mais frequentes exibem hábito tabular, designados comumente por "chapéus-de-frade", e constituídos de dois indivíduos octaédricos achatados, segundo o plano de geminação (Figura 29). Nas amostras dêste tipo, pode-se notar a substituição dos vértices e arestas dos octaedros, por faces curvas, como ocorre na forma simples. Num dêstes geminados, do tipo hexatetraédrico, o maior desenvolvimento de um dos cristais resultou numa forma singular, que, de início, sugere a geminação múltipla (Figura 30).

A geminação cruzada é relativamente comum nos cristais cúbicos (Figura 31), verificando-se, num dos exemplares, acentuada diferença

Fig. 29 - Geminado segundo a lei do espinélio

Fig. 30 - Geminado hexatetraédrico, pseudo-múltiplo

de coloração dos dois indivíduos. Este tipo de geminação pode ser interpretado, geometricamente, de maneira análoga à anterior. Do ponto-de-vista estrutural, porém, deve-se admitir a existência de um plano de composição original diferente de (111).

Fig. 31 - Geminado cúbico cruzado

Fig. 32 - Geminado múltiplo, em "estrela"

Os geminados múltiplos podem apresentar formas arredondadas e irregulares, mas obedecem às condições verificadas na geminação simples. Encontraram-se, entre as amostras estudadas, agrupamentos deste tipo, constituídos por três indivíduos, não se observando o paralelismo entre os elementos de geminação. O geminado múltiplo descrito por Palache (1932), também presente nos diamantes do Triângulo, pode ser considerado como dois geminados simples, parcialmente cruzados (Figura 32).

Por meio de difração de raios X, verificou-se, ainda, um geminado com forma externa perfeitamente octaédrica, limitada por faces pla-

nas e irregularmente corroídas, não se determinando, contudo, o caráter simples ou múltiplo da geminação.

5. FREQUÊNCIA DAS FORMAS CRISTALOGRÁFICAS

O estudo da frequência das diversas formas e hábitos, presentes nos diamantes do Triângulo Mineiro, deveria restringir-se a áreas diamantíferas isoladas. Os resultados, neste caso, seriam mais úteis, podendo-se verificar as variações morfológicas, nos diferentes depósitos. A incerteza da proveniência exata de muitas amostras impediu tal procedimento, e os resultados do presente estudo podem ser considerados representativos, respeitando-se as características da amostragem efetuada. O tamanho dos cristais, por exemplo, deve ser um dos primeiros fatores a ser observado, verificando-se, de imediato, a predominância de indivíduos geminados ou de formas irregulares, nas amostras de peso superior a 0,5 quilates métricos. De outro lado, em cristais pouco desenvolvidos (inferiores a 0,10 quilates), pode-se notar a ocorrência frequente de rombododecaedros equidimensionais, com faces lisas e arredondadas.

Na Tabela 4 é mostrada a frequência percentual, segundo as formas e hábitos presentes. Foram, aqui, separadas as formas combinadas em transicionais, com faces curvas associadas à forma $\{111\}$, e formas combinadas autênticas, que apresentam a combinação das formas $\{111\}$, $\{110\}$ e $\{100\}$ ou $\{111\}$ e $\{100\}$, pois parecem originadas por processos diversos.

Nota-se, entre os diamantes do Triângulo, a predominância da forma simples rombododecaédrica, seguindo-lhe, em frequência, os geminados de contorno irregular.

6. ORIGEM DAS FORMAS CRISTALOGRÁFICAS

A morfologia cristalina é, atualmente, explicada, em base estrutural, pela teoria dos vetores PBC, de Hartman e Perdok (1955), que admite, no cristal, a existência de cadeias de ligações periódicas (Periodic Bond Chain ou PBC), paralelas aos principais eixos de zona e formadas pelas sucessivas ligações entre as partículas vizinhas, mais fortemente unidas entre si. As faces paralelas aos PBC serão, portanto, as mais desen-

Tabela 4

Frequência percentual de formas e hábitos

Formas	Frequência em %	Hábito	Frequência em %
Simples	45	Octaédrico	35
		Rombododecaédrico	63
		Cúbico	2
Combinadas	10	Combinado Transicional	78
		Combinado Autêntico	22
Irregulares	12		
Geminados	33	Tabular	33
		Cúbico cruzado	4
		Irregular	58
		Múltiplo	5

volvidas e, nos cristais onde aparecem mais de um destes vetores, pode-se classificá-las em três tipos, de diferentes expressões morfológicas: faces F (flat: plana), paralelas a pelo menos dois PBC e, conseqüentemente, as mais prováveis superfícies de equilíbrio; faces S (stepped: escalonada), paralelas a um vetor PBC e de ocorrência possível; e faces K (kinked: reticulada), não paralelas a nenhum PBC, o que torna improvável o seu desenvolvimento. As variações morfológicas observadas em muitos casos, são explicadas pela influência de impurezas, que se depositam simultaneamente e em níveis epitáxicos, alterando as direções dos PBC.

No diamante, as ligações covalentes entre os átomos de carbono, se efetuam, inicialmente, na direção $[111]$, mas, a sua repetição periódica, resulta num vetor PBC paralelo a $[110]$ (Figura 33). A única forma do tipo F, possível, neste caso, seria o octaedro, seguindo-lhe, em ordem decrescente de importância morfológica, as formas S: $\{110\}$, $\{100\}$, $\{311\}$ e $\{331\}$. A predominância do hábito rombododecaédrico sobre o cúbico é admitida pela maior velocidade de cristalização, ao longo de $[100]$

(Hartman, 1953).

Seguindo esta interpretação e considerando, ainda, as condições particulares sob as quais o diamante se desenvolve, que limitam a interferência de impurezas, a única forma de equilíbrio admissível seria o octaedro. Esta conclusão pode ser facilmente atestada pela grande improbabilidade da mudança no mecanismo de crescimento, quando êste se verifica de maneira simples, como no diamante. Dêste modo, as formas tipo K ou S e de ocorrência comum, seriam improváveis como resultado de crescimento cristalino.

Fig. 33 - Vetores PBC no diamante

Constitui, ainda, flagrante anomalia, a frequência da forma rombododecaédrica, nunca observada como forma de crescimento. Além disso, são raramente encontradas, entre os diamantes artificiais, ocorrendo somente quando há suspeita de dissolução, durante a síntese (Bovenkerk, 1961; Bezrukow et al., 1966). A presença da face (110) plana, em algumas formas combinadas, pode ser interpretada como resultante de faces vici-nais, do tipo (111), e não como plano de crescimento.

A forma de equilíbrio cúbica foi observada apenas em diamantes sintéticos, obtidos sob condições de pressão e temperatura mínimas (Bovenkerk, 1961), e deve resultar do efeito de impurezas. A frequência dêste hábito, em variedades opacas e translúcidas, de diamantes do Triângulo, além da presença de camadas com diferentes tonalidades, paralelas a (100), observadas num dêstes exemplares (Figura 34), sugere que êste tipo de crescimento também se processe naturalmente. O aparente paradoxo, entre o hábito hexatetraédrico da amostra e o mecanismo de crescimento, dificilmente poderia ser explicado pelo desenvolvimento cristalino normal.

Estas evidências, somadas aos resultados das observações sôbre figuras e estruturas de superfícies (tratados em capítulo à parte), indicam que as formas anômalas devem originar-se de processos de dissolução.

Fig. 34 - Níveis de crescimento paralelos a (100) em cristal hexatetraédrico (x 4)

Este fenômeno é resultante da combustão parcial do diamante, em ambiente oxidante e a temperaturas provavelmente elevadas. No laboratório, podem-se reproduzir condições análogas e pode-se provocar facilmente a corrosão destes cristais, com KNO_3 , ao redor de 500°C . Como a dissolução, neste caso, é muito rápida, as formas obtidas são irregulares, mas, em condições especiais, a forma de dissolução pode assemelhar-se às formas de crescimento, constituindo isto um meio de determinação da simetria cristalina (Buerger, 1956).

Outros agentes oxidantes, ainda citados, na corrosão do diamante, são o CO_2 , a 1350°C (Evans e Phaál, 1962), ou mesmo o O_2 , a baixas pressões (Omar e Kenawi, 1957). Em diamantes artificiais, a corrosão se efetua quando a pressão não é mantida, em altas temperaturas, e a passagem abrupta da dissolução ao crescimento torna freqüente a alternância destes dois processos, durante a síntese.

Fig. 35 - Configuração estável de (111)

Fig. 36 - Configuração estável de (100)

Fig. 37 - Configuração estável de (110)

Admitindo-se a dissolução como o inverso do crescimento, podem-se também determinar as formas de equilíbrio possíveis, com base es

trutural, e aplicando-se o método de Stranski-Kaishev (Simon, 1968a), que leva em conta o trabalho de separação das partículas do edifício cristalino.

Na configuração estável da face de octaedro (Figura 35), pode-se notar que cada átomo, pertencente ao vetores PBC, se liga a três outros do nível subjacente; e, para que a dissolução se verifique, é necessário que se rompam estas três ligações. A superfície de equilíbrio do cubo (Figura 36) mostra que os átomos estão agora ligados a apenas dois outros, da camada imediatamente inferior, e, na face (110) (Figura 37), cada um dos elementos dos vetores PBC se une a somente uma partícula do substrato. Disto pode-se concluir que as velocidades de dissolução devem variar, conforme a direção considerada, sendo maior ao longo de [110] e mais lenta em [111], decorrendo, como forma de equilíbrio, o rombododecaedro. Nesta forma, os principais eixos de zona correspondem às direções [111] e as faces desenvolvem-se perpendicularmente a [110].

A variação morfológica, observada nas formas de dissolução, poderia resultar das diferentes concentrações do solvente (Buerger, 1956), e também da forma inicial, da qual deriva.

Entre os hábitos, descritos em diamantes do Triângulo Mineiro, podem-se considerar como originados por crescimento cristalino, o octaedro, o cubo, e a forma combinada de {111}, {110} e {100}. A dissolução destes cristais originaria as formas simples com faces curvas, desenvolvendo-se, primeiramente as formas combinadas transitacionais; em seguida, o hexatetraedro ou o trioctaedro, dependendo do hábito inicial; e, num estágio final, o rombododecaedro (Figura 38).

Fig. 38 - Evolução da morfologia do diamante, explicada por meio da dissolução natural

V. FIGURAS E ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIE

A observação das marcas naturais que ocorrem na superfície do diamante, constitui meio seguro para a orientação do cristal, podendo também fornecer informações úteis sobre o processo de desenvolvimento das formas cristalográficas, ou do seu mecanismo de crescimento. O grande número de publicações que trata do assunto, reflete a importância deste tipo de estudo para o perfeito esclarecimento das condições da gênese do diamante: as marcas de superfície revelam o último estágio da evolução do cristal.

Algumas destas figuras originam-se de processos diversos, como os moldes e "crateras", deixados por inclusões. Porém, a maioria das marcas de superfície mostra, nitidamente, o efeito da dissolução, existindo, ainda, algumas cuja origem é duvidosa, não se podendo provar se resultam de crescimento ou de corrosão. No entanto, nos cristais onde elas aparecem, notam-se, também, figuras provocadas por dissolução (Patel e Agarwal, 1965), o que leva a concluir que somente as feições macroscópicas de crescimento devam ocorrer na superfície de diamantes naturais. Outro fato interessante e que comprova esta afirmação, é a presença, em diamantes sintéticos, de espirais de crescimento, na face do cubo (Tolansky e Sunagawa, 1959) e do octaedro (Patel e Ramachandran, 1968), não encontradas em diamantes naturais.

Muitas das marcas superficiais do diamante são visíveis à vista desarmada, havendo casos, no entanto, em que somente se tornam perceptíveis com grande ampliação. Quando isto ocorre, tais figuras podem distribuir-se regularmente sobre a superfície do cristal, revelando estruturas muitas vezes macroscópicas e intimamente ligadas ao crescimento cristalino.

Considerando que as figuras e estruturas de superfície como típicas, em cristais da mesma procedência (Seal, 1962), pode-se avaliar a sua importância, como elemento de caracterização do diamante do Triângulo Mineiro.

1. FACES DE OCTAEDRO

Nos planos (111), frequentemente se observam depressões de contorno triangular, denominadas trógonos, com fundo plano (Figura 39) ou escalonado, que, muitas vezes, se desenvolvem como pirâmides negativas (Figura 40). A profundidade e o tamanho destas figuras são variáveis, mas o ângulo formado entre os planos das pirâmides e a face do octaedro é mais ou menos constante, variando de $0^{\circ}40'$ a $2^{\circ}40'$, dados estes obtidos de figuras interferométricas. Estes valores indicam que tais faces não constituem planos reticulares com índices millerianos simples, e, portanto, devem ser instáveis, como forma de crescimento.

Fig. 39 - Trógonos com fundo plano (x 75)

Fig. 40 - Trógonos com fundo do piramidado (x75)

Algumas vezes, os trógonos de fundo plano apresentam contorno hexagonal, o que se observa também nas figuras de fundo piramidado (Figura 41). Em trógonos deste tipo, porém pouco desenvolvidos, pode-se notar o contorno hexagonal perfeito que, em alguns casos, mostra duas fases na evolução (Figura 42).

Fig. 41 - "Trógonos" com contorno hexagonal (x 130)

Fig. 42 - "Trógonos" hexagonal mostrando duas fases na evolução (x 130)

Comumente, os trógonos orientam-se opostamente, com relação ao contorno triangular da face do octaedro, mas podem-se também encontrar figuras concordantes, e esta aparente anomalia faz perdurar, até hoje, as controvérsias sobre a sua origem. As tentativas para obter artificialmente estas figuras, por meio da corrosão do diamante em KNO_3 fundido a 500°C , revelaram trógonos concordantemente orientados, nas faces (111), o que levou Williams (1932), Halperin (1956) e Tolansky (1960) a admitir o crescimento como responsável pelas figuras em oposição. Há autores, contudo, que as interpretam como efeito de agentes corrosivos, não importando a sua orientação. No entanto, parecem inacessíveis, as provas seguras para apoiar-se esta ou aquela suposição.

Considerando-se que o germe de crescimento bidimensional estável, na face (111), apresenta contorno triangular, concordante com as arestas do octaedro (Simon, 1968a), a nucleação em três pontos diferentes desta face, poderá originar cavidades triangulares em oposição (Figura 43). A cristalização rápida, por outro lado, formará, inicialmente, cristais esqueléticos (Bovenkerk, 1961), e o crescimento ulterior poderá delimitar cavidades, agora concordantes com as arestas do octaedro. Esta última suposição é, contudo, pouco provável, devido à configuração instável das camadas de crescimento (Simon, 1968a). Na dissolução, o mesmo deve verificar-se: quando a corrosão se processa lentamente, a forma estável da ca

Fig. 43 - Trógonos originados por crescimento

Fig. 44 - Configuração estável do triângulo

vidade estará em oposição a (111) (Figura 44); no entanto, quando a dissolução é violenta, como a realizada por meios artificiais, as figuras poderão orientar-se concordantemente.

Admitindo-se, por motivos já expostos, que devem ser raros

os cristais que apresentem figuras de crescimento em escala microscópica, a maioria dos trígonos observados deve originar-se de dissolução, orientando-se opostamente devido talvez à lentidão do processo natural. De outro lado, a distribuição regular destas figuras, ao longo de possíveis defeitos lineares (111) (Figura 45) e a sua presença em planos de clivagem (Figura 46), dificilmente podem ser explicadas pelo crescimento cristalino.

Fig. 45 - Trígonos alinhados (x 130)

Fig. 46 - Trígonos em planos de clivagem (x 100)

Fig. 47 - Trígonos concordan-
tes, pouco desenvol-
vidos (x 130)

Fig. 48 - Trígonos concordan-
tes e em oposição
(x 130)

Em cristais onde se observam trígonos isorientados, estes se apresentam ora numerosos e pouco desenvolvidos (Figura 47), o que denota maior intensidade da corrosão, ora de maneira esparsa, ocorrendo ao lado de figuras em oposição (Figura 48). A interação destes dois processos corrosivos simultaneamente, poderia originar as cavidades de contorno hexagonal. É possível, também, admitir a orientação anômala dos trígonos como resultado de geminação em escala microscópica, o que, na realidade, se observa em alguns geminados de contorno octaédrico, onde

ocorrem trógonos isorientados.

Além dos trógonos, alguns cristais exibem lineamentos formando o padrão reticulado hexagonal, resultante, talvez, de impacto, que poderia ter provocado o aparecimento de fendas de clivagem, ao longo dos planos (111) (Figura 49).

Fig. 49 - Figuras de impacto em (111)
(x 75)

2. FACES DE ROMBODODECAEDRO

As marcas superficiais, nas faces de rombododecaedro, não apresentam a regularidade das figuras observadas em (111) e sua origem pode ser interpretada de diversos modos, mas admitindo-se sempre que a feição final resulte da dissolução. Assim, nas faces (110) planas, podem-se verificar estrias paralelas, ao longo da sua diagonal maior, originadas, inicialmente, pelo crescimento, segundo faces vicinais do tipo (111) (Figura 50). Estas estrias, observadas mesmo a olho nu, denotam, com maior ou menor intensidade, o efeito da corrosão, o que se verifica ao microscópio, pelo seu arredondamento, a ponto de se transformarem em colinas grosseiramente elípticas e muito alongadas (Figura 51).

Fig. 50 - Estrias em (110)
(x 130)

Fig. 51 - Figuras alongadas em (110) (x 100)

Em apenas uma amostra, parcialmente recoberta por película verde e transparente ("coated diamond"), os planos de rombododecaedro apresentavam superfície escabrosa, resultante da interrupção das estrias, por planos (100), formando colinas de contorno geométrico definido e delimitadas por faces de cubo e octaedro, onde se pode notar a presença de pequenos triângulos (Figura 52). No topo de algumas destas elevações, é possível encontrarem-se faces (110) estriadas e pouco desenvolvidas.

Nas superfícies (110) dos cristais arredondados, as colinas elípticas acima descritas tornam-se menos alongadas, mostrando-se mais regulares nas proximidades dos vértices quádruplos, que podem ser interpretadas como testemunhos de contorno octaédrico (Figura 53). Uma dissolução mais intensa, pode, no entanto, arredondá-las, tirando-lhes esta ca

Fig. 52 - Elevações de contorno geométrico definido em (110) (x 130)

Fig. 53 - Elevações de contorno octaédrico em (110) (x 50)

Fig. 54 - Colinas arredondadas em (110) (x 75)

Fig. 55 - Formação das colinas em (110)

racterística (Figura 54). As figuras deste tipo são facilmente explicadas pela dissolução diferencial: as camadas estruturalmente mais perfeitas, se

rão também as mais resistentes à corrosão e, dêste modo, podem aflorar na superfície rombododecaédrica recurvada (Figura 55). Esta interpretação pode ser admitida pelo diferente comportamento dos diamantes do tipo I e do tipo II, quando submetidos à dissolução (Halperin, 1956), e pela presença, no mesmo cristal, de camadas de ambos os tipos (Tolansky, 1966). Alguns autores, no entanto (Williams, 1932; Tolansky, 1960), não admitem esta suposição e consideram o crescimento cristalino como responsável pela origem destas figuras.

Muitas vezes, estas marcas são microscópicas e agrupam-se regularmente, revelando a estrutura zonada do cristal, originada pela flutuação das condições ambientes, durante o crescimento, o que resulta na deposição de camadas com diferentes resistências à corrosão. Estruturas dêste tipo já foram observadas em secções paralelas a (100), artificialmente corroídas (Seal, 1965), onde se notam níveis de crescimento formando 90° entre si e interrompidos, em seus vértices, pela face curva do cristal.

Fig. 56 - Estrutura zonada em (110) (x 75)

Fig. 57 - Estrutura reticular em (110) (x50)

A projeção destas camadas, sobre a superfície rombododecaédrica recurvada, apresenta contorno pseudo-hexagonal, com bordos arredondados (Figura 56) e a única maneira de explicar estas figuras é admitir a face (110) como consequência de dissolução.

Algumas vezes, a estrutura zonada não se apresenta bem definida e os níveis de crescimento mostram-se entrelaçados, o que provoca o aparecimento de uma estrutura reticular (Figura 57), cuja origem, segundo Fersman e Goldschmidt (1911), deve-se à geminação polissintética, porém não comprovada experimentalmente. Williams (1932), já as interpreta como efeito de deslizamento, durante a cristalização, o que é pouco provável, pelas propriedades mecânicas incomuns do diamante. Uma interpretação,

talvez mais segura, poderia considerar a migração dos defeitos cristalinos dos níveis de crescimento, que, dêste modo, se distribuiriam por todo o plano (111), após a cristalização. A corrosão ulterior revelaria, então, o entrelaçamento das lineações.

Em algumas amostras, as figuras características da superfície rombododecaédrica apresentam-se de maneira anômala (Figura 58), e orientadas diferentemente, como os triângulos. Nos cristais onde ocorrem, podem-se também observar triângulos em concordância, o que talvez explique a sua origem por um processo corrosivo mais intenso.

Além destas figuras, observadas na superfície de quase todos os cristais rombododecaédricos, em algumas amostras onde as faces se apresentam extremamente lisas, observam-se figuras de impacto, semelhantes às que ocorrem em (111). No entanto, o contorno é agora pseudo-hexagonal ou losangular, delimitado pela projeção da clivagem octaédrica no plano (110) (Figura 59).

Fig. 58 - Figuras anômalas em (110) (x 100)

Fig. 59 - Figuras de impacto em (110) (x100)

É possível, ainda, encontrar, nas superfícies (110) mais perfeitas, pequenas marcas circulares (microdiscos) (Figura 60), originadas pela proteção, durante o ataque químico, por bolhas de gás, aderentes à superfície do cristal (Tolansky, 1960). Contudo, algumas destas figuras apresentam-se como círculos absolutamente perfeitos, com pequena cavidade localizada no centro (Figura 61), e parecem originadas de processo diverso.

Fig. 60 - Microdiscos em
(110) (x 100)

Fig. 61 - Disco circular em
(110) (x 75)

3. FACES DE CUBO

Nas faces de cubo, sempre ocorrem figuras características, como os trógonos. São cavidades de contorno quadrado ou retangular, escalonadas ou piramidais (Figura 62). As medidas interferométricas, neste caso, foram impraticáveis, pela irregularidade da superfície (100), não se podendo tomá-la como plano de referência. Contudo, parecem pouco profundas,

Fig. 62 - Figuras em
(100) (x 120)

Fig. 63 - Figuras de im-
pacto em (100)
(x 100)

em relação à área superficial e, conseqüentemente, os planos piramidais devem apresentar índices millerianos elevados. Estas cavidades sempre se encontram orientadas, a 45° das arestas [100] e figuras semelhantes, obtidas por corrosão artificial, mas orientadas paralelamente às arestas do cubo, sugeriram a Williams (1932) interpretá-las como originadas por crescimento cristalino. As mesmas considerações admitidas nos casos anteriores, são talvez cabíveis aqui: as figuras de crescimento, na superfície

de diamantes naturais, devem ser improváveis, e as diferentes orientações das figuras poderiam ser explicadas por processos corrosivos diversos.

Nas faces de alguns cristais cúbicos, onde a superfície (100) se mostra mais regular, é possível notar figuras de impacto, de padrão retangular, originadas pelas projeções das clivagens (111), no plano do cubo (Figura 63).

4. ESTRUTURAS DE SUPERFÍCIES EM GEMINADOS

Em exemplares geminados, ocorrem as mesmas figuras já descritas nos indivíduos isolados; no entanto, ao longo da superfície de contacto dos dois cristais, observa-se uma interferência entre as figuras de corrosão, resultando daí estruturas características, denominadas "suturas" ou "costuras" (Figura 64). Às vezes, é possível identificar os indivíduos, pelo diferente comportamento que apresentam, quanto à dissolução natural (Figura 65).

Fig. 64 - "Suturas" em geminado múltiplo (x 25)

Fig. 65 - Dissolução diferencial em geminado (x 25)

As estruturas mais interessantes são, no entanto, originadas pela interação das estruturas zonadas dos dois cristais geminados, dando em resultado padrões complexos, de difícil interpretação. Porém, algumas destas estruturas, mostram, distintamente, o zoneamento de cada um dos indivíduos (Figura 66). Neste caso, nota-se também a estrutura reticular, complicada pela presença de dois cristais. É frequente, ainda, encontrarem-se lineações, formando ângulos de 15° , que podem ser explica-

das tal como a estrutura reticular da face (110).

Fig. 66 - Estrutura zonada
em geminado(x40)

VI. ESPECTROSCOPIA

1. ESPECTROGRAFIA DE ABSORÇÃO ÀS RADIAÇÕES INFRA-VERMELHAS

A classificação do diamante, segundo os tipos, Ia, Ib, IIa e IIb, é possível pelos espectros de absorção aos raios infravermelhos. As frequências das vibrações, no retículo cristalino do diamante ideal, (tipo IIa) devem se estender, teoricamente, de 1.400 cm^{-1} até 300 cm^{-1} (Sutherland, Blackwell e Simeral, 1954). A distribuição das frequências fundamentais é, no entanto, mais difícil de precisar, e nem todas participam efetivamente da absorção, aparecendo, na realidade, bandas de absorção resultantes de combinações dessas frequências. Assim, os diamantes do tipo II, absorvem nas regiões de 1.800 cm^{-1} e 200 cm^{-1} , que correspondem às frequências fundamentais, apresentando, ainda, na região das combinações, picos de absorção entre 1.800 cm^{-1} e 3.500 cm^{-1} . Qualquer defeito cristalino que modifique a simetria entre dois átomos de carbono, pode originar frequências diferentes, sob forma de absorção anômala, abaixo de 1.800 cm^{-1} .

As bandas de absorção comuns a todos os diamantes, são atribuídas ao processo fonon-2 (de 2.000 a 2.500 cm^{-1}) e fonon-3 (de 3.100 a 3.500 cm^{-1}), estando os picos característicos localizados nas frequências de 1.977 , 2.034 , 2.160 , 2.400 e 2.920 cm^{-1} (Charette, 1961; Wedephol, 1957).

Os diamantes impuros (tipos Ia e Ib), apresentam absorção anômala, entre 1.540 e 328 cm^{-1} , e, mesmo antes da subdivisão dos diamantes do tipo I em Ia e Ib, Sutherland et al. (1954), já haviam notado que estas bandas poderiam se situar em dois grupos A e B, quanto à variação das intensidades relativas dos picos de absorção. Deste modo, as bandas do grupo A, mais largas e correspondentes aos diamantes Ia, localizam-se em 1.282 , 1.203 , 1.093 e 480 cm^{-1} , enquanto que os diamantes Ib, apresentando o sistema de absorção B, mostram picos bem pronunciados em 1.426 , 1.372 e 328 cm^{-1} , absorvendo ainda, nas regiões de 1.171 , 1.003 e 780 cm^{-1} . Os picos observados a 1.520 e 1.540 cm^{-1} parecem não se relacionar com nenhum dos tipos considerados.

Os diamantes IIb apresentam as mesmas bandas de IIa e absorvem quase continuamente, entre 20.000 e 3.330 cm^{-1} . Os picos mais definidos (Wedephol, 1957), localizaram-se em 2.915 , 2.809 , 2.793 e 2.457 cm^{-1} .

Os espectros onde figuram apenas picos característicos de somente um tipo de diamante, são raramente observados, ocorrendo mais comumente, a sobreposição das bandas de absorção de mais de um tipo. Entretanto, a atual classificação dos diamantes, é procedente (Du Preez e Raal, 1965), pois a maioria dos cristais mostra, nos espectros, de absorção IV. ou UV., a predominância de um tipo único.

O estudo espectrográfico dos diamantes provenientes do Triângulo Mineiro, foi efetuado com 39 amostras transparentes, de diferentes hábitos e colorações, com o objetivo de relacionar essas propriedades com os tipos já mencionados. O método experimental utilizado e aplicável ao material bruto, limitou, no entanto, o tamanho das amostras, entre $0,1$ e $0,4$ quilates métricos, o que pode interferir na frequência dos diversos tipos, no lote estudado. Além disso, a irregularidade dos exemplares, provocando reflexões internas, pode originar interferências de pseudo-absorções, o que dificulta a interpretação dos diagramas, sem influir, contudo, nos resultados observados.

Nos espectrogramas obtidos, compreendendo o intervalo de 4.000 e 670 cm^{-1} , verificou-se a presença de picos bem pronunciados e, entre essas bandas, quase todas se situam nas regiões de absorção de cada tipo. No entanto, os picos a 3.230 , 3.100 , 3.320 e 870 cm^{-1} , observados em pequeno número de amostras, parecem não ter sido anteriormente encontrados. A absorção em 3.230 cm^{-1} foi verificada em apenas dois exemplares do tipo I, apresentando faces (100) pouco desenvolvidas e coloração verde-azulada. No entanto, nem todas as amostras azuis ou verdes e mostrando faces de cubo, absorvem nesta frequência. A absorção na região de 3.100 cm^{-1} parece não se relacionar com a cor ou com a morfologia, e ocorre somente em diamantes do tipo I. O pico a 2.320 cm^{-1} foi observado em duas amostras, uma de coloração verde-amarelado e aspecto opalescente, e outra parcialmente recoberta por película transparente de cor verde. Um espectro, obtido com o feixe percorrendo a parte incolor deste último exemplar, não apresentou absorção nessa frequência. A absorção a 870 cm^{-1} foi verificada em amostras que apresentavam inclusões microscópicas, podendo, por -

tanto, ser explicadas pela presença dessas impurezas.

A distinção dos diamantes I e II pode-se efetuar pela ausência de absorção abaixo de 1.800 cm^{-1} , nos diamantes do tipo II (Figura 67), sendo possível, no entanto, a ocorrência de tipos intermediários, com bandas pouco pronunciadas na região de $7\text{ a }9\mu$. Os diamantes do tipo Ia e Ib (Figuras 68 e 69) podem distinguir-se quanto à intensidade relativa dos picos, a 1.370 ,

Fig. 67 - Espectro de absorção infravermelho de diamante do tipo II

Fig. 68 - Espectro de absorção infravermelho de diamante do tipo Ia

1.281 e 1.170 cm^{-1} (Du Preez e Raal, 1965). Porém, diamantes apresentando somente as absorções características do grupo B, não foram observados, encontrando-se apenas os tipos intermediários entre Ia e Ib, com predominância do tipo Ib (Figura 69). Muitos destes diamantes são dificilmente caracterizados, pela equivalência das intensidades relativas das bandas do grupo A e B e foram considerados como tipos intermediários (Figura 70).

Fig. 69 - Espectro de absorção infravermelho de diamante do tipo Ib

Fig. 70 - Espectro de absorção infravermelho de diamante intermediário Ia-Ib

Os diamantes característicos do tipo Ia são mais facilmente encontrados e os espectrogramas mostram a interferência quase desprezível das bandas do sistema B.

A ocorrência dos diversos tipos, entre os diamantes do Triângulo Mineiro, é mostrada na Tabela 5, onde se nota a ausência de cristais do tipo IIb, não encontrados no lote estudado. Pode-se verificar, ainda, a frequência anômala de diamantes do tipo II, talvez explicável pelo tamanho reduzido das amostras, pois os cristais menos desenvolvidos são fisicamente os mais perfeitos (Tolansky, 1967). Os diamantes do tipo Ib, raros entre os diamantes naturais, mostram-se frequentes nos exemplares do Triângulo, o que pode constituir um elemento seguro para a sua caracterização.

Tabela 5

Distribuição dos diamantes quanto ao tipo

Tipo	Frequência (em %)
Ia	26
Ib	15
Intermediário	
Ia-Ib	38
IIa	5
Intermediário	
I-II	13

2. FLUORESCÊNCIA AO ULTRAVIOLETA

Os diamantes, geralmente do tipo I, podem apresentar fluorescência azul ou verde, sendo as bandas de emissão centradas em $4.150 \text{ \AA}$ e $5.032 \text{ \AA}$, estendendo-se para regiões de comprimentos de onda mais curtos (Mitchell, 1964).

Cêrca de 32% das amostras do Triângulo Mineiro, quando submetidas à radiação ultravioleta, mostram fluorescência azul, verde e amarelo-alaranjado, sendo, esta última, talvez devida à cauda de um terceiro sistema de emissão, situado além do visível, com centro em $7.140 \text{ \AA}$. Muitas vezes, a luminescência parece concentrar-se em pequenas áreas, ao redor de inclusões, ou na superfície de contacto de geminados.

Os diamantes que exibem fluorescência azul, na maioria incolores, são geralmente fosforescentes, e êste caráter se acentua nas amostras que apresentam fluorescência mais intensa. Em cristais verde-amarelados ou branco-amarelados, pode-se encontrar a fluorescência verde. Neste caso, somente as amostras que apresentam forte luminescência, são também ligeiramente fosforescentes. A fluorescência amarelo-alaranjado, raramente observada, é pouco intensa e restringe-se a regiões limitadas no cristal.

A tabela 6 mostra a distribuição em percentagem dos diversos tipos de fluorescência. A precariedade do método experimental impediu incluir os cristais que apresentam fluorescência pouco intensa, imperceptível pela simples observação. Dêste modo, um estudo com maiores re-

curiosos, poderá revelar maior ocorrência de amostras fluorescentes.

Tabela 6

Distribuição dos diamantes quanto à fluorescência

Fluorescência	Frequência (em %)
Azul	66
Verde	28
Amarelo-alaranjado	6

VII. INCLUSÕES

As inclusões em diamante são conhecidas desde o século passado e a sua identificação, até bem pouco tempo, era efetuada por simples observação à lupa ou ao microscópio, o que conduzia, muitas vezes, a resultados pouco seguros. Além disso, não havia preocupação em se distinguir as inclusões singenéticas, formadas simultaneamente com o diamante, das inclusões epigenéticas, originadas "a posteriori" e que preenchem fendas e cavidades do hospedeiro. Dêste modo, a interpretação das associações paragenéticas não poderia indicar, com segurança, as condições ambientes na formação do diamante.

Wagner (1914), através da microscopia óptica, identificou o diopsídio e o piropo, como inclusões frequentes em diamantes sul-africanos. Sutton (1921), estudando diamantes da mesma região, acrescentou a granada, a ilmenita, a olivina e a pirita, mencionando, ainda, como inclusões prováveis, o zircão e a mica. Estes minerais foram por êle considerados inclu-sões preformadas, pois podem ocorrer como hospedeiros do diamante. A grafita e o próprio diamante, também encontrados, foram classificados como inclusões contemporâneas.

Em 1923, Colony descreveu a presença de cristais de quartzo, desenvolvendo-se juntamente com material detrítico de coloração verde, ao longo de planos de clivagem, em diamantes provenientes do Brasil. Esta associação fêz com que se acreditasse estar o diamante brasileiro genética-mente ligado a rochas ácidas (Guimarães, 1934).

Friedel (1923), descreveu a ocorrência de grafita, já mencionada por Sutton(1921); e a presença de magnetita, sob a forma de cristais octaédricos e magnéticos, foi notada por Spencer (1924).

Muitas inclusões negras, comuns em diamante, segundo Williams (1932), devem ser partículas do magma original, englobados pelo hospedeiro. Este Autor descreveu, além dos minerais já anteriormente citados, a ocorrência de piroxênio e mica, de composição não determinada, em diamantes da África do Sul.

Em estudo sistemático, aplicando, porém, apenas recursos ópticos, Gubelin (1952), classifica as inclusões em preformadas: olivina, granada, enstatita, magnetita, diopsídio, zircão, grafita, biotita, clorita e flogopita; e contemporâneas: granada, cromoespinélio, magnetita, ilmenita, hematita, zircão, grafita e, talvez, enstatita, além do próprio diamante. No mesmo trabalho, o Autor ainda menciona a presença de quartzo, em diamantes brasileiros, não esclarecendo, contudo, tratar-se de inclusão preformada ou contemporânea.

A identificação das inclusões, aplicando meios mais seguros, foi introduzida por Giardini e Mitchell (1953), quando se observou a presença de cristais de olivina orientados em diamante, através da difração de raios X, empregando-se o método de Weissenberg. Pouco depois, Autores russos (Futergendler, 1956 e 1958; Gnevushev e Nikolaeva, 1958; Orolof, 1959; Futergendler e Frank-Kamenetskii, 1961), também confirmaram, por difração de raios X (método de Laue), a ocorrência de granada, diopsídio, cromoespinélio, diamante, além da olivina, em amostras dos depósitos dos Urais e da Sibéria. Orolof (1959), cita, ainda, a serpentina, a grafita e a goethita, como inclusões epigenéticas.

A coesita, variedade polimórfica da sílica, estável a altas pressões, pode também ocorrer como inclusão de diamantes sintéticos (Milledge, 1961).

Eppler (1961), em trabalho semelhante ao desenvolvido por Gubelin (1952), acrescenta a apatita, entre as inclusões. Porém, a caracterização deste mineral, através apenas de um de seus índices de refração ($n = 1,6585$), é pouco segura e ainda não foi confirmada em diagramas de difração de raios X.

A ocorrência de pirrotita, pentlandita e cohenita, em diamantes sul-africanos, foi notada por Sharp (1966), que as considera como epigenéticas e talvez originadas pela exsolução de sulfetos mais estáveis a altas pressões, incluídos pelo diamante durante a cristalização.

Camargo e Leite (1968), através da difração de raios X (método da precessão), identificaram a olivina como inclusão de diamantes brasileiros.

Utilizando também a difração de raios X (método de Laue), Harris (1968) identificou vinte e duas espécies minerais, como inclusões de diamantes da África do Sul, Ghana e Serra Leoa. As inclusões singenéticas encontradas, foram: diamante, coesita, olivina, enstatita, granada, diopsí

dio, magnetita, ilmenita, cromoespinélio, rutilo e brookita, sendo, estas duas últimas, já citadas por Gnevushev e Nikolaeva (1961). As inclusões epigenéticas foram divididas, pelo Autor, em três grupos, com diferentes modos de ocorrência:

- a. agregados policristalinos ou cristais alotriomorfos: goethita, quartzo e, possivelmente, moscovita;
- b. agregados policristalinos, desenvolvendo-se ao redor de inclusões singenéticas: grafita, pirrotita e pentlandita;
- c. minerais que preenchem fendas e planos de clivagem: calcita, hematita, caulinita, sellaita e xenotima.

Os minerais dos dois primeiros grupos encontram-se totalmente incluídos no hospedeiro, não se comunicando com a superfície, através de fendas visíveis. Segundo o Autor, devem ser considerados epigenéticos, pela sua instabilidade sob pressões e temperaturas elevadas, originados, talvez, de processos de exsolução ou transformação polimórfica.

Para a identificação das inclusões dos diamantes do Triângulo Mineiro, selecionou-se, ao microscópio e à lupa binocular, cerca de 39 amostras que foran, posteriormente, submetidas à difração de raios X. Estes exemplares mostravam inclusões totalmente englobadas pelo diamante, não se comunicando com a superfície do cristal, por meio de fendas observáveis, mesmo ao microscópio, com aumento aproximado de 240 x. Dêste modo, as inclusões estudadas podem ser tanto singenéticas como epigenéticas, mas revelam somente o material incluído pelo hospedeiro, durante o crescimento dêste. Em algumas amostras, onde se observa, ao lado de inclusões dêste tipo, a presença de material detrítico, em fendas ou cavidades, os diagramas de raios X podem mostrar também as raia características de agregados policristalinos.

As inclusões identificadas: olivina, granada, cromoespinélio, pentlandita e diamante, serão descritas a seguir.

1. OLIVINA

As olivinas, principalmente as de composição química mais próxima da forsterita, são as inclusões heterogêneas mais comuns, no diamante. Ocorrem, geralmente como cristais incolores, e, quando bem desenvolvidos (0,5 mm no máximo), podem ser facilmente observados, mesmo à vista desarmada, constituindo o que os garimpeiros denominam "bô-lhas", o que se deve ao seu pequeno índice de refração ($\beta = 1,651$), quando

comparado ao do hospedeiro ($n = 2,41$). São raras as amostras de diamante que apresentam somente um cristal incluído, sendo mais freqüente a presença de um grupo de três ou mais indivíduos, muitas vezes isorientados (Figura 71). Em alguns diamantes, pode mesmo ocorrer um grande número dessas inclusões, porém pouco desenvolvidas e associadas a inclusões negras, não identificadas (Figura 72). A presença de olivina, sob a forma de poeira cristalina, já foi assinalada por Gnevushev e Futergendler (1963).

Fig. 71 - Inclusões de olivina isorientadas (x 50)

Fig. 72 - Inclusões de olivina associadas a inclusões negras (x 80)

As inclusões de olivina, bem como outras, podem provocar tensões internas no hospedeiro, devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica. Dêste modo, muitas delas ocorrem sempre associadas a fendas de tensão que se assemelham, ao microscópio, a inclusões negras de forma placóide ou irregular. Se estas fendas se desenvolvem no hospedeiro, o alívio de tensão pode provocar a fragmentação do cristal incluído, que se torna quase opaco (Figura 75). Estas tensões são responsáveis também pela birrefringência anômala do diamante, o que dificulta a determinação do caráter mono ou birrefringente da inclusão.

a. Morfologia

Os cristais incluídos apresentam, comumente, formas geométricas definidas, segundo hábitos equidimensionais, tabulares ou alongados, ocorrendo sempre um arredondamento das arestas, devido talvez ao crescimento segundo faces vicinais. É possível, contudo, encontrarem-se cristais irregulares, que podem assumir formas estranhas (Figura 73), fato já ressaltado por Eppler (1961). As formas equidimensionais podem apresentar

arestas bem pronunciadas e a face mais desenvolvida nesses cristais tem formato pseudo-hexagonal (Figura 74). Os cristais tabulares já são mais arredondados (Figura 75), e, em indivíduos alongados, pode-se também notar o contorno pseudo-hexagonal (Figura 76). Esta propriedade talvez seja o principal caráter distintivo da olivina, pois sempre se observa, ao microscópio polarizador e com nícois cruzados, extinção reta ou simétrica nos cristais tabulares e equidimensionais ou extinção a 35° da direção de maior desenvolvimento nos cristais alongados.

Fig. 73 - Inclusão de olivina com forma estranha (x 100)

Fig. 74 - Inclusão de olivina equidimensional (x 100)

Fig. 75 - Inclusões de olivina tabular e alongada (x 16)

Quando separados do hospedeiro, os cristais de olivina fraturam-se facilmente, e, devido ao seu pequeno tamanho, foram mal sucedidas as tentativas para obtenção de medidas goniométricas. No entanto, pelo menos nas inclusões equidimensionais, uma das faces mais desenvolvidas é (100), pela orientação da figura de interferência.

b. Difração de raios X

Entre as 230 amostras estudadas, 31 diamantes apresentam, ao microscópio, inclusões com as características acima descritas. Dentre ês

tes exemplares, seis foram selecionados para o exame aos raios X (método da precessão): amostra 1 (Rio Dourados); amostra 11 (Rio Dourados); amostra 13 (Rio Indaiá); amostra 18 (sem procedência segura); amostra 34 (Rio Santo Inácio); e amostra 35 (Rio Douradinho). As distâncias interplanares e os ângulos entre as direções do retículo recíproco, determinados sobre diagramas de precessão permitiram a determinação dos índices das reflexões observadas, constantes na Tabela 7 (página seguinte), procedendo-se de maneira já descrita anteriormente (Cap. II, pg. 12). Nesta operação, utilizou-se a projeção estereográfica da forsterita, obtida com os valores angulares tabulados por Dana (1920?).

Os "d"s observados possibilitaram o cálculo das constantes reticulares das inclusões de olivina, aplicando-se, para o refinamento destes parâmetros, o método gráfico-analítico (Camargo e Inglez, 1967), ligeiramente modificado. Por este método, a determinação dos parâmetros unitários de cristais rômnicos é possível, tomando-se três reflexões próximas e de índices quaisquer, o que resulta num sistema de três equações, onde as incógnitas são as constantes procuradas. Considerando-se, no entanto, a relação paramétrica fundamental como aproximadamente conhecida (caso de termos de séries isomorfas), este procedimento é dispensável e os parâmetros podem ser obtidos através de apenas uma equação. Assim, tomando-se uma reflexão (hkl), qualquer, é possível calcular as constantes reticulares pelas expressões:

$$a_o = a \cdot d_{hkl} \cdot N$$

$$b_o = d_{hkl} \cdot N$$

$$c_o = c \cdot d_{hkl} \cdot N$$

onde a e c são os termos da relação paramétrica fundamental $a : b : c$, que, no caso da forsterita é igual a 0,467 : 1 : 0,587 (Dana, 1920?),

$$e N = \sqrt{h^2/a^2 + k^2/b^2 + l^2/c^2}$$

Os parâmetros obtidos desta forma foram, posteriormente, extrapolados, segundo o procedimento normal do método gráfico-analítico, após a verificação de sua aplicabilidade em diagramas de precessão (Camargo et al., 1969). Os d_{hkl} teóricos, calculados a partir destes parâmetros unitários extrapolados e constantes na Tabela 8, são mostrados juntamente com os d_{hkl} observados na Tabela 7, onde se pode notar a concordância com os dados experimentais obtidos.

Tabela 7

Distâncias interplanares das inclusões de olivina

Amostra 1			Amostra 11			Amostra 13		
$d_{hkl} (\text{\AA})$			$d_{hkl} (\text{\AA})$			$d_{hkl} (\text{\AA})$		
hk	obs	calc	hk	obs	calc	hk	obs	calc
020	5,144	5,177	021	3,876	3,880	101	3,741	3,738
021	3,905	3,895	101	3,735	3,720	120	3,495	3,488
101	3,750	3,736	130	2,762	2,765	121	3,024	3,017
111	3,532	3,510	022	2,576	2,579	002	3,003	3,003
120	3,502	3,490	112	2,458	2,456	130	2,787	2,774
130	2,770	2,775	140	2,244	2,247	131	2,519	2,518
022	2,606	2,592	023	1,854	1,857	112	2,458	2,467
131	2,520	2,524	133	1,618	1,617	041	2,356	2,352
112	2,471	2,469	062	1,478	1,478	122	2,280	2,276
122	2,281	2,278	170	1,393	1,393	211	2,165	2,168
211	2,169	2,168				132	2,040	2,038
						222	1,758	1,755
						240	1,755	1,745
						241	1,682	1,675
						242	1,509	1,508
						062	1,478	1,482
						333	1,163	1,170
						244	1,143	1,138

Amostra 18			Amostra 34			Amostra 35		
$d_{hkl} (\text{\AA})$			$d_{hkl} (\text{\AA})$			$d_{hkl} (\text{\AA})$		
hk	obs	calc	hk	obs	calc	hk	obs	calc
021	3,877	3,877	021	3,903	3,891	111	3,495	3,497
101	3,725	3,725	101	3,737	3,733	130	2,769	2,764
112	2,458	2,457	120	3,485	3,485	112	2,457	2,457
122	2,268	2,267	122	2,273	2,273	042	1,938	1,939
211	2,154	2,160	042	1,945	1,944	151	1,795	1,788
222	1,748	1,748	202	1,862	1,865	222	1,746	1,748
240	1,740	1,738	240	1,741	1,742	241	1,669	1,670
312	1,387	1,387	143	1,495	1,495	333	1,165	1,165
303	1,242	1,241	223	1,466	1,467	352	1,152	1,154
244	1,134	1,134	261	1,353	1,350			
334	1,036	1,036	322	1,353	1,353			
			341	1,315	1,316			
			063	1,295	1,296			
			303	1,242	1,244			
			244	1,136	1,137			
			164	1,096	1,095			
			324	1,066	1,066			

Tabela 8

Parâmetros unitários extrapolados das inclusões de olivina

Amostra	a_o	b_o	c_o
1	$4,773 \pm 0,010$	$10,232 \pm 0,015$	$6,013 \pm 0,010$
11	$4,750 \pm 0,007$	$10,202 \pm 0,012$	$5,979 \pm 0,007$
13	$4,774 \pm 0,010$	$10,221 \pm 0,026$	$6,005 \pm 0,008$
18	$4,755 \pm 0,005$	$10,187 \pm 0,010$	$5,983 \pm 0,005$
34	$4,765 \pm 0,005$	$10,215 \pm 0,010$	$5,999 \pm 0,006$
35	$4,756 \pm 0,007$	$10,190 \pm 0,012$	$5,983 \pm 0,007$

c. Composição química

A composição química das inclusões pode ser facilmente determinada, a partir dos parâmetros da cela unitária, pois estas constantes aumentam, continuamente, na medida em que o Mg é substituído pelo Fe. Um dos métodos utilizados nesta determinação consiste em obter-se o valor do espaçamento entre os planos (130) e aplicá-lo na equação da curva determinativa, estabelecida por Yoder e Sahama (1957), onde a composição é dada por:

$$Fo \text{ (mol \%)} = 4233,91 - 1494,59 \cdot d_{130}$$

No entanto, este processo utiliza os valores de somente dois parâmetros unitários e, desde que os diagramas de precessão permitem a medida de a_o , b_o e c_o , pode-se obter a composição química da inclusão com maior segurança, através destas três constantes.

A determinação, neste caso, pode ser efetuada graficamente, conhecendo-se, "a priori", as constantes unitárias dos termos extremos da série isomorfa da olivina (Yoder e Sahama, 1957):

	Forsterita	Fayalita
a_o (Å)	$4,756 \pm 0,005$	$4,817 \pm 0,005$
b_o (Å)	$10,195 \pm 0,005$	$10,477 \pm 0,005$
c_o (Å)	$5,891 \pm 0,010$	$6,105 \pm 0,010$

Assim, o parâmetro unitário da inclusão, obtido experimentalmente, colocado sobre as curvas de variação de a_o , b_o e c_o da olivina, com relação à sua composição química, pode, imediatamente, localizá-la dentro da série forsterita-fayalita.

Na Figura 77(a e b) este procedimento é efetuado para cada um dos parâmetros das seis inclusões estudadas. A composição média pode, assim, ser obtida graficamente, pela reta mais próxima dos três segmentos determinados sobre as curvas de variação de a_o , b_o e c_o .

Dêste modo, pode-se verificar que as inclusões de olivina têm composição muito próxima do termo magnesiano (Tabela 9),havendo, mesmo, algumas, onde os parâmetros unitários são idênticos aos da forsterita 100 % pura.Outras, têm composição variável, mas as amostras mais ricas em Fe podem ainda ser incluídas dentro do termo crisolita ($Mg_{0,80}Fe_{0,20}SiO_4$).

A confirmação destas determinações foi realizada com a medida dos índices de refração de uma das inclusões (amostra 34), depois de destacada do hospedeiro. Os valores obtidos pelo método da imersão: $\alpha = 1,652$, $\beta = 1,668$ e $\gamma = 1,686$, colocados sobre a curva de variação destas propriedades com relação à composição química da olivina(Deer et al., 1962), forneceram: $Mg_{0,92}Fe_{0,08}SiO_4$, o que concorda com o dado obtido pelos parâmetros unitários.

Tabela 9

Composição química das inclusões de olivina		
Amostra	Forsterita(%)	Fayalita(%)
1	80	20
11	98	2
13	85	15
18	98	2
34	90	10
35	98	2

d. Orientação

A orientação da olivina, no diamante, foi primeiramente observada por Giardini e Mitchell (1953), e a inclusão, bem desenvolvida e alongada na direção [110] do diamante, mostrava a coincidência do plano(010),

Fig. 77a - Determinação gráfica da composição química das inclusões de olivina

Fig. 77b - Determinação gráfica da composição química das inclusões de olivina

com o plano (111) do hospedeiro. A razão dêste desenvolvimento epitáxico foi interpretada por Hartman (1954), pela equivalência das translações reticulares e dos ângulos formados entre as direções onde se verificavam as coincidências das translações. Posteriormente, Harris (1966), descreveu uma nova orientação, onde o plano (010) da olivina também coincidia com o plano (111) do diamante. Porém, o ajuste dos dois retículos, no plano comum aos dois cristais, se efetuava de modo diverso ao descrito anteriormente. O crescimento epitáxico, neste caso, pode ser explicado de maneira análoga, pela equivalência de translações e dos ângulos, nas direções consideradas. Harris, no mesmo trabalho, ainda menciona a possibilidade de outras orientações epitáxicas, pela posição relativa das reflexões do diamante e da olivina, observada em diagramas de Laue. Em 1969, Camargo e Leite citaram dois outros tipos de orientações epitáxicas: orientação A, onde (100) da olivina coincide com (111) do diamante; e orientação B, onde a coincidência se efetua entre os planos (001) da inclusão e (111) do diamante.

A orientação de Giardini e Mitchell (1953), foi observada na amostra 11 (Figura 78), onde a inclusão de olivina se desenvolve na direção [110] de um octaedro de diamante que, por sua vez, se encontra incluído por um cristal maior. A orientação mútua dos dois diamantes obedece à geminação, segundo (111). O ângulo de extinção nesse cristal alongado de olivina ($\beta \wedge [101] \cong 35^\circ$), juntamente com os dados obtidos dos diagramas de precessão, permitiram o reconhecimento desta epitaxia. Contudo, pode-se notar ligeiro desvio, na coincidência dos planos (111) do hospedeiro e (010) da inclusão, na projeção estereográfica, obtida dos diagramas de precessão e que mostra a orientação mútua dos dois cristais (Figura 79). Desvios de até 10° da orientação epitáxica teórica, foram já notados por Harris et al. (1966).

A orientação proposta por Harris (1966), foi encontrada na inclusão alongada da amostra 1 (Figura 75). O ângulo de extinção com a direção de maior desenvolvimento é também aproximadamente 35° , e a projeção estereográfica, efetuada com base nos diagramas de precessão, revela um desvio de cerca de 8° da posição de coincidência teórica (Figura 80).

Nas inclusões das amostras 13, 34 e 35 (equidimensionais ou ligeiramente alongadas), pode-se notar a coincidência dos planos (100) da

Fig. 78 - Inclusão de olivina orientada, segundo orientação de Giardini e Mitchell, (1952). (amostra 11)

Fig. 79 - Estereograma mostrando a orientação mútua da olivina e diamante (orientação Giardini e Mitchell, 1953)

Fig. 80 - Estereograma mostrando a orientação mútua da olivina e diamante (orientação Harris, 1966)

Fig. 81 - Diagrama de precessão mostrando a orientação A

olivina e (111) do diamante (orientação A), o que também se confirma em diagramas de precessão para orientação dos cristais (Figura 81). Esta possibilidade de epitaxia foi já suspeitada por Harris (1966), por ser a mais compátivel com a orientação dos tetraedros de SiO_4 da olivina, com relação aos do diamante (Figura 82). O desenvolvimento epitáxico é também

Fig. 82 - Tetraedros de SiO_4 e de diamante, isorientados (orientação A)

perfeitamente justificável, pela coincidência dos nós reticulares, em três direções não coplanares (Tabela 10). A extinção, neste caso, é simétrica ou reta e, nas projeções estereográficas, a partir dos dados experimentais, podem-se também notar pequenos desvios da posição de epitaxia ideal (Figura 83).

Tabela 10

Orientação A

	Diamante	Olivina	Desvio
Plano de coincidência	(1 $\bar{1}$ 1)	(100)	
Direção 1	[011]	[001]	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	17,64(7T [011])	17,97(3T [001])	1,8%
Direção 2	[21 $\bar{1}$]	[010]	
Translação em 2 ($\text{\AA}$)	30,59(7T [21 $\bar{1}$])	30,60(3T [010])	0,3%
Ângulo entre 1 e 2	90°	90°	
Direção 3	[1 $\bar{1}$ 1]	[100]	
Translação em 3 ($\text{\AA}$)	18,54(3T [1 $\bar{1}$ 1])	19,04(4T [100])	2,7%

Fig. 83 - Estereograma mostrando a orientação mútua da olivina e diamante (orientação A)

Outra interpretação para este crescimento orientado da olivina, poderia considerar a coincidência dos planos (133) da inclusão e (111) do diamante, pois o ângulo diedro teórico, entre os planos (100) e (133) da olivina (igual a 70° para a forsterita), é muito próximo ao formado pelas faces (111) e $(1\bar{1}1)$ do diamante.

No cristal tabular da amostra 1 (Figura 75) e na inclusão da amostra 18, se observa perfeito paralelismo entre as faces (001) da olivina e (111) do diamante (orientação B), o que se pode comprovar no diagrama de precessão (foto para orientação), mostrado na Figura 84. O desenvolvimento orientado da inclusão pode também ser interpretado, como nos casos

Fig. 84 - Diagrama de precessão mostrando a orientação B

anteriores, pela igualdade das translações e dos ângulos, no plano comum aos dois cristais (Tabela 11). A projeção estereográfica, possível através dos diagramas de precessão, revela o desvio de alguns graus da posição teórica de coincidência, no caso da amostra 18 (Figura 85).

Fig. 85 - Estereograma mostrando a orientação mútua da olivina e diamante (orientação B)

Nos outros exemplares, contendo inclusões de olivina, estes cristais parecem, também, estar orientados, segundo um dos tipos acima descritos, o que se conclui pela sua morfologia e ângulos de extinção.

Tabela 11

Orientação B (olivina tabular)

	Diamante	Olivina	Desvio
Plano de coincidência	(111)	(001)	
Direção 1	$[0\bar{1}1]$	$[1\bar{2}0]$	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	20, 16(8T $[0\bar{1}1]$)	20, 95(1T $[1\bar{2}0]$)	3, 9%
Direção 2	$[1\bar{2}1]$	$[2\bar{1}0]$	
Translação em 2 ($\text{\AA}$)	13, 11(3T $[1\bar{2}1]$)	13, 95(1T $[2\bar{1}0]$)	6, 4%
Ângulo entre 1 e 2	$30^{\circ}00'$	$29^{\circ}53'$	
Direção 3	$[111]$	$[001]$	
Translação em 3 ($\text{\AA}$)	6, 18(1T $[111]$)	5, 99(1T $[001]$)	3, 2%

2. GRANADA

As inclusões de granada são encontradas raramente, nos diamantes do Triângulo Mineiro. No total das amostras estudadas, observaram-se somente três exemplares que apresentavam inclusões deste tipo: amostra 36 (Rio Douradinho); amostra 38 (sem procedência segura) e amostra 39 (Rio Indaiá).

Apesar de monorrefringentes, estas inclusões são dificilmente identificadas apenas por via óptica, pois tal caráter é mascarado pela birrefringência anômala do hospedeiro. No entanto, alguns cristais (amostras 38 e 39), podem apresentar coloração entre rosa e vermelho, o que talvez seja suficiente para distinguir a granada das demais inclusões presentes no diamante, considerando que tais tonalidades são mais comuns nas granadas (Harris, 1968). A outra inclusão (amostra 36), quando observada no interior do hospedeiro, apresentava-se incolor, sugerindo, à primeira vista, tratar-se de olivina: suspeita reforçada pelo hábito sub-idiomórfico e alongado. Depois de destacada do diamante, foi possível, no entanto, observar a coloração amarela-alaranjada, com reflexos dourados, semelhante à descrita por Futergendler (1958) e Orlof (1959), em granadas de diamantes russos.

O hábito nos outros cristais de granada, é também sub-idiomórfico e alongado, podendo-se notar, ainda, o arredondamento de algumas arestas. A forma rombododecaédrica, mais desenvolvida na direção [001], e apresentando faces planas, lisas ou estriadas, pode ser notada na granada incluída na amostra 36 (Figura 86). A generalização destas observações é, no entanto insegura, em virtude do pequeno número de amostras estudadas.

Fig. 86 - Inclusão de granada com faces estriadas (x 50)

Os parâmetros unitários das três inclusões foram determinados em diagramas de precessão, como no caso das olivinas. As distâncias interplanares obtidas (Tabela 12) possibilitaram o cálculo dos a_0 , que foram posteriormente extrapolados pelo método gráfico-analítico (Tabela 13).

Os d_{hkl} teóricos, calculados a partir destas constantes, são mostrados na Tabela 12, ao lado dos valores observados.

Tabela 12

Distâncias interplanares das inclusões de granada

Amostra 36			Amostra 38			Amostra 39		
d_{hkl} (Å)			d_{hkl} (Å)			d_{hkl} (Å)		
hkl	obs	calc	hkl	obs	calc	hkl	obs	calc
420	2,606	2,606	220	4,080	4,078	420	2,578	2,574
521	2,125	2,127	420	2,582	2,579	521	2,099	2,102
440	2,059	2,059	642	1,540	1,541	440	2,037	2,034
444	1,681	1,681	840	1,290	1,289	444	1,658	1,662
642	1,557	1,556	842	1,258	1,258	642	1,539	1,538
741	1,432	1,434	864	1,070	1,071	732	1,463	1,462
840	1,303	1,302	10.42	1,053	1,053	840	1,288	1,287
842	1,272	1,271	880	1,020	1,019	941	1,163	1,163
941	1,176	1,176				10.42	1,050	1,051
10.42	1,063	1,063				864	1,069	1,069
880	1,029	1,029				880	1,019	1,017
						12.60	0,857	0,858
						888	0,830	0,831

Tabela 13

Parâmetros unitários extrapolados e índices de refração das inclusões de granada

Amostra	a_o	n
36	$11,647 \pm 0,012$	1,78
38	$11,533 \pm 0,012$	1,76
39	$11,511 \pm 0,015$	-

Na série isomorfa das granadas, somente a determinação do parâmetro unitário a_o não é suficiente para a sua perfeita identificação, visto que se pode considerar a existência de cinco termos principais, mais frequentes (Deer et al., 1962): almandina, andradita, grossulária, piropo e espessartita, o que torna necessária, também, para isto, a medida da densidade e índice de refração. Tratando-se, no entanto, de cristais diminutos

(0,3 mm no máximo), a determinação da densidade é difícil e, deste modo, a composição química das inclusões não pôde ser perfeitamente estabelecida.

Os valores de a_o , juntamente com os índices de refração, medidos nas amostras 36 e 38 (Tabela 13), possibilitaram, no entanto, estimar a composição química dessas inclusões, com relação a três componentes, entre as cinco principais da série das granadas. Utilizou-se, para isto, o método gráfico, introduzido por Sriramadas (1957), partindo-se do princípio que a maioria das granadas (cêrca de 65%) podem ser expressas com relação a apenas três das componentes acima citadas. Os resultados assim obtidos, mostram diversas composições químicas compatíveis com as constantes utilizadas na sua determinação. Verifica-se, entretanto (Tabela 14), que quase tôdas as interpretações possíveis indicam a predominância do têrmo magnesiano (piropo), seguindo-lhe, em ordem decrescente, as componentes ricas em Fe (almandina) e Ca (andradita). O diamante 39 foi preservado para estudos futuros e, por esta razão, não se determinou o índice de refração da granada nele incluída. O parâmetro unitário dêste cristal ($a_o = 11,511 \text{ \AA}$), indica, no entanto, a predominância das componentes ferro-magnesianas cujos parâmetros variam de $11,46 \text{ \AA}$ (piropo) a $11,53 \text{ \AA}$ (almandina).

Tabela 14

Composição química das inclusões de granada

Amostra	% Andradita	% Almandina	% Piropo	% Espessartita	% Grossulária
	-	10	50	40	-
36	-	38	51	-	11
	9	25	66	-	-
	32	11	57	-	-
38	26	-	63	-	11
	-	50	10	-	40

A orientação de granadas incluídas em diamante já foi observada por Futergendler e Kamenetskii (1961), por meio de difração de raios X. Neste caso, verificou-se sômente a coincidência das direções [100] do

diamante e $[100]$ da inclusão, pois $T_{[100]}$ da granada (= a 11,60 Å) corresponde a 10/3 de $T_{[100]}$ do hospedeiro (= a 11,89 Å), sendo o desvio igual a 2,5%. O paralelismo entre os planos (111) do diamante e (110) da granada foi também notado por Eppler (1961), através da microscopia óptica. A equivalência de translações é também possível: $T_{[110]}$ da granada (= a 16,40 Å), equivale a 8/3 de $T_{[111]}$ do diamante (= a 16,48 Å), com discordância de apenas 0,5%.

As granadas incluídas nos diamantes do Triângulo Mineiro, parecem também estar orientadas. Contudo, o número reduzido de amostras estudadas torna inseguro tomar como gerais os tipos de orientação observados.

No diagrama de precessão mostrado na Figura 87 (Amostra 39), pode-se notar o perfeito paralelismo entre as zonas $[1\bar{1}0]$ do diamante e $[2\bar{1}1]$ da granada e, nesta zona, observa-se, ainda, a proximidade dos planos (001) do hospedeiro e (011) da inclusão. Estes dados, colocados em projeção estereográfica (Figura 88), mostram, de outro lado, a coincidência da direção $[11\bar{1}]$ da granada e $[110]$ do diamante, sendo o desvio, de aproximadamente 5° .

Fig. 87 - Diagrama de precessão mostrando a orientação da amostra 39 (orientação A)

Fig. 88 - Estereograma mostrando a orientação mútua da granada e diamante, amostra 39 (orientação A)

A equivalência das translações, ao longo destes eixos é também verificada (Tabela 15) e tal interpretação é muito próxima (desvio de 10°) da orientação observada por Futergendler e Kamenetskii (1961).

Tabela 15

Orientação A (amostra 39)

	Diamante	Granada	Desvio
Plano de coincidência	(001)	(011)	
Direção 1	$[1\bar{1}0]$	$[2\bar{1}1]$	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	55,44(11. T $[0\bar{1}1]$)	56,82(2. T $[2\bar{1}1]$)	2,5%
Direção 2	$[110]$	$[11\bar{1}]$	
Translação em 2 ($\text{\AA}$)	20,16(4. T $[110]$)	20,09(1. T $[11\bar{1}]$)	0,4%
Ângulo entre 1 e 2	90°	90°	
Direção 3	$[001]$	$[011]$	
Translação em 3 ($\text{\AA}$)	32,13(9. T $[001]$)	32,80(2. T $[011]$)	2,0%

Uma outra orientação possível, para as inclusões de granada, pode ser comprovada pelo diagrama de precessão da amostra 36 (Figura 89), onde se observa a coincidência das direções $[112]$ do hospedeiro e $[121]$ da inclusão. Os dados obtidos neste diagrama podem fornecer duas interpretações possíveis, para a orientação mútua dos dois cristais. Numa delas (Figura 90), pode-se observar a coincidência dos planos $(\bar{1}11)$ do diamante e $(\bar{1}11)$ da inclusão, o que também se verifica no diagrama de precessão da

Fig. 89 - Diagrama de precessão mostrando a orientação da amostra 36 (orientação B)

amostra 38 (Figura 91). A partir deste diagrama, a orientação mútua dos dois cristais pode, igualmente, ser interpretada de duas maneiras e uma delas coincide com uma das interpretações do diagrama da amostra 36. Nes

te caso, a epitaxia da granada, com relação ao diamante, pode também ser explicada pela equivalência das translações reticulares (Tabela 16).

Fig. 90 - Estereograma mostrando a orientação mútua da granada e diamante (orientação B)

Fig. 91 - Diagrama de precessão mostrando a orientação da amostra 38 (orientação B)

Tabela 16

Orientação B (amostras 36 e 38)

	Diamante	Granada	Desvio
Plano de coincidência	$(\bar{1}11)$	$(\bar{1}11)$	
Direção 1	$[0\bar{1}1]$	$[1\bar{1}2]$	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	55,44(11. T $[0\bar{1}1]$)	56,82(2. T $[1\bar{1}2]$)	2,5%
Direção 2	$[101]$	$[211]$	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	55,44(11. T $[101]$)	56,82(2. T $[211]$)	2,5%
Direção 3	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}11]$	
Translação em 3 ($\text{\AA}$)	61,80(10. T $[\bar{1}11]$)	60,27(3. T $[\bar{1}11]$)	2,4%

3. CROMITA

As inclusões de cromita (cromoespinélio), quando observadas ao microscópio, apresentam hábitos e colorações variáveis. Quando transparentes, é possível observar a côr de café, que se torna negra nas variedades opacas. O hábito é geralmente irregular e, neste caso, os cristais parecem ser arredondados, assemelhando-se a pequenos seixos rolados incluídos pelo hospedeiro (Figura 92). Cristais apresentando formas geométricas definidas são também encontrados, sendo hábito octaédrico, tabular segundo (111), e de contorno hexagonal (Figura 93).

Fig. 92 - Inclusões de cromita (x 75)

Fig. 93 - Inclusão de cromita (octaedro tabular) (x 60)

Nos diamantes do lote estudado, observaram-se apenas seis exemplares contendo inclusões deste tipo, entre os quais quatro foram selecionados para o exame aos raios X: amostra 2 (Rio Indaiá); amostra 6 (sem procedência segura); amostra 8 (Rio Indaiá) e amostra 33 (Rio Paranaíba).

Os diagramas de precessão destes cristais forneceram as distâncias interplanares da Tabela 17, mostradas ao lado dos valores teóricos, calculados a partir dos parâmetros unitários extrapolados pelo método gráfico-analítico (Tabela 18).

Estes parâmetros, juntamente com os dados ópticos, indicam que as inclusões devem apresentar composição química próxima do termo magnesiano, na série isomorfa da cromita (magnesiocromita). Contudo, o a_0 destas inclusões, em geral inferior ao da magnesiocromita pura ($a_0 = 8,334 \text{ \AA}$), pode sugerir uma possível substituição parcial do Cr pelo Al. Neste caso, uma interpretação mais segura poderia considerar as inclusões como simples cromoespinélios.

A orientação da cromita, em diamante, já foi observada em dia

Tabela 17

Distâncias interplanares das inclusões de cromita

hkl	Amostra 2		Amostra 6		Amostra 8		Amostra 33	
	$d_{hkl} (\text{\AA})$		$d_{hkl} (\text{\AA})$		$d_{hkl} (\text{\AA})$		$d_{hkl} (\text{\AA})$	
	obs	calc	obs	calc	obs	calc	obs	calc
111	4,780	4,794					4,791	4,794
220	2,932	2,936	2,941	2,942	2,951	2,954	2,931	2,940
311	2,505	2,503	2,508	2,508	2,513	2,518	2,501	2,506
222					2,409	2,411	2,396	2,400
400	2,075	2,076			2,088	2,088		
333					1,608	1,608	1,597	1,600
511	1,597	1,598						
440			1,470	1,471	1,476	1,477	1,467	1,470
531							1,403	1,405
533	1,266	1,266						
622							1,252	1,253
444					1,206	1,206	1,199	1,200
642							1,110	1,111
553					1,088	1,087		
731							1,082	1,082
800	1,040	1,038						
662					0,958	0,958		
840					0,932	0,934		
844	0,848	0,848						

Tabela 18

Parâmetros unitários extrapolados das inclusões de cromita

Amostra	a_0
2	8,304 $\pm$ 0,005
6	8,32 $\pm$ 0,01
8	8,353 $\pm$ 0,005
33	8,313 $\pm$ 0,005

gramas de raios X, mostrando a isorientação dos dois cristais (Futergendler e Frank-Kamenetskii, 1961) e o desenvolvimento epitáxico obedecendo a estas condições, foi também verificado, em amostras do Triângulo Mineiro (Figura 94). A epitaxia, neste caso, pode igualmente ser explicada pela equivalência das translações reticulares: $T_{[100]}^{\circ}$ da cromita ($\approx 8,32 \text{ \AA}$) é igual a $7/3$ de $T_{[100]}^{\circ}$ do diamante ($= 8,33 \text{ \AA}$).

Fig. 94 - Diagrama de precessão mostrando a isorientação da cromita e diamante

Uma outra orientação, ainda não citada anteriormente, e encontrada em apenas um exemplar (amostra 33), é semelhante à descrita para as inclusões de granada (amostras 36 e 38). A projeção estereográfica, possível através dos dados de precessão, mostra o paralelismo entre os planos (111) dos dois cristais. A igualdade de translações, neste plano, e as direções coincidentes constam na Tabela 19.

Tabela 19

Orientação da cromita (amostra 33)

	Diamante	Cromita	Desvio
Plano de coincidência	$(\bar{1}11)$	$(\bar{1}11)$	
Direção 1	$[0\bar{1}1]$	$[1\bar{1}2]$	
Translação em 1 ($\text{\AA}$)	20,16(4. $T_{[0\bar{1}1]}^{\circ}$)	20,33(1. $T_{[1\bar{1}2]}^{\circ}$)	0,9%
Direção 2	$[101]$	$[211]$	
Translação em 2 ($\text{\AA}$)	20,16(4. $T_{[101]}^{\circ}$)	20,33(1. $T_{[211]}^{\circ}$)	0,9%
Direção 3	$[\bar{1}11]$	$[\bar{1}11]$	
Translação em 3 ($\text{\AA}$)	43,26(7. $T_{[\bar{1}11]}^{\circ}$)	43,14(3. $T_{[\bar{1}11]}^{\circ}$)	0,3%

4. PENTLANDITA

A pentlandita foi identificada em somente uma amostra verde-azulada, sem procedência segura (amostra 15), que, quando observada ao microscópio, apresentava apenas inclusões negras, sendo, algumas, de contorno triangular. Estas inclusões ocorrem, também, em muitos diamantes que, quando submetidos à difração de raios X, não apresentam inclusões heterogêneas. As irregularidades, na superfície do hospedeiro, impossibilitaram maiores informações e, considerando-se, ainda, a pequena intensidade das manchas de difração da pentlandita, observada nos diagramas de raios X, pode-se concluir que se tratam de cristais pouco desenvolvidos, o que talvez tenha impedido a sua observação direta ao microscópio.

O parâmetro $a_0 = 10,08 \text{ \AA}$ desta inclusão, foi obtido pela média dos valores calculados a partir das distâncias interplanares, determinadas sobre diagramas de precessão (Figura 95), onde também se observa o desenvolvimento isorientado dos dois cristais. Esta epitaxia é possível, pois $T [100]_0$ da pentlandita ($\approx 10,80 \text{ \AA}$) equivale a $3 \cdot T [100]$ do diamante ($= 10,71 \text{ \AA}$), com discordância da ordem de 0,9%.

Fig. 95 - Diagrama de precessão mostrando a isorientação da pentlandita e diamante

5. DIAMANTE

As inclusões de diamante não devem ser consideradas como inclusões propriamente ditas, pois o que ocorre na realidade é um simples zoneamento ou geminação, durante a cristalização. No caso de geminação, pelo maior desenvolvimento de um dos indivíduos, um passa a englobar o outro. Cristais de diamante, incluídos no próprio diamante, são visíveis somente quando ambos os indivíduos apresentam colorações diferentes, o que não se observou nos diamantes do Triângulo; ou quando o diamante incluído

se apresenta recoberto por inclusões negras (Figura 96). No entanto, mesmo assim, é difícil a observação do cristal incluído, pois, geralmente, a recobertura é apenas parcial. Quando o capeamento envolve totalmente a inclusão, esta pode ser facilmente confundida com outras inclusões opacas (cromita ou magnetita) (Figura 97). Algumas vezes, a presença do cristal incluído é verificada somente sob a lâmpada de quartzo, quando se pode notar a fluorescência da inclusão, no interior do hospedeiro não fluorescente.

Fig.96 - Inclusão de diamante parcial - mente recoberto (x 40)

Fig.97 - Inclusão de diamante totalmente recoberto (x 130)

As inclusões de diamante se orientam em relação ao hospedeiro e, neste caso, o desenvolvimento é paralelo ou obedece à geminação, segundo (111). Em nenhum dos casos estudados, as inclusões são dispostas ao acaso.

6. INCLUSÕES NÃO IDENTIFICADAS

Durante os trabalhos de identificação de inclusões em diamantes do Triângulo Mineiro, a maioria dos cristais estudados não revelou, sob os raios X, a presença de inclusões heterogêneas. Quando observados ao microscópio, estes exemplares mostravam, no entanto, inclusões negras, com reflexos metálicos e formas variáveis, mas geralmente aciculares, placóides ou irregulares (Figura 98). As inclusões placóides sempre se orientam paralelamente ao plano (111) do hospedeiro e podem desenvolver formas geométricas definidas, apresentando contorno triangular ou hexagonal (Figura 99). A orientação é, também, verificada nas inclusões aciculares (Figura 100) e, neste caso, ocorrem alongadas, segundo [110] do diamante. As inclusões irregulares lembram fendas ou fraturas de tensão (Figura 101)

Fig. 98 - Inclusões negras irregulares (x50)

Fig. 99 - Inclusões negras com contorno triangular (x 150)

Fig. 100 - Inclusões negras aciculares e orientadas (x 100)

Fig. 101 - Inclusões negras (fraturas de tensão) (x 50)

Fig. 102 - Inclusões distribuídas em (111) do diamante (x 65)

Fig. 103 - Inclusões ao longo da superfície de contacto de geminados (x 130)

e, algumas vezes, formam-se pelo agrupamento de pequenas inclusões planocóides ou aciculares, que podem-se distribuir paralelamente a (111) do hospedeiro (Figura 102). Este último tipo de inclusão é comum em cristais que

apresentam a associação das formas simples $\{111\}$, $\{110\}$ e $\{100\}$, vulgarmente denominados "cascudos".

A análise química de uma destas inclusões (placóide e de contorno irregular), obtida na microsonda da Castaing (electron microprobe), revelou somente a presença de carbono, podendo-se concluir, disto, que devem ser de grafita, já verificada por Harris (1968), ou devem resultar simplesmente de defeitos cristalinos, originados durante o crescimento do cristal de diamante. Esta última suposição talvez mais viável pode ser comprovada não só pela ausência das reflexões características da grafita, em 16 amostras estudadas por difração de raios X, como pela ocorrência frequente destas inclusões negras, ao longo da superfície de contacto de geminados (Figura 103), fato já notado por Slawson (1950). Estes defeitos talvez pudessem ser interpretados como grafitização parcial, o que foi admitido por Friedel (1932), para as variedades negras de diamante. Neste caso, seria possível registrar-se a presença de grafita, em diagramas de raios X, desde que esta ocorra em cristais relativamente desenvolvidos.

Outras inclusões não identificadas, porém menos frequentes que as primeiras, parecem também tratar-se de material homogêneo. São pequenas "pintas" esféricas (Figura 104), situadas próximo da superfície do hospedeiro, com diâmetro máximo de 0,1 mm, coloração verde-azulada ou castanho-avermelhada e bordos indistintos, o que talvez indique a continuidade do meio óptico. Estas "pintas", principalmente as de cor verde-azul, provocam forte birrefringência, bem caracterizada, no diamante circundante (Figura 105). Em geral, ocorrem isoladas, mas podem agrupar-se, chegando a recobrir, parcial ou totalmente, o hospedeiro (Figura 106).

Os exemplares que apresentam este tipo de inclusão, quando submetidos à difração de raios X, mostram somente a presença das reflexões do diamante, razão pela qual estas "pintas" devem constituir apenas regiões do diamante sob a influência de tensões, talvez originadas pela presença de impurezas. A análise química de elementos menores, em diamantes que apresentam estas inclusões verde-azuladas, revela, de fato, teores anômalos de Fe e Si (Gnevushev e Kravtsov, 1961). No entanto, uma outra hipótese (Bobryevich et al., 1959), as considera como resultado de radioatividade natural. A presença de figuras superficiais circulares (microdiscos) com pequena cavidade situada exatamente no centro parece estar associada a estas inclusões (Figura 107), o que talvez apóie a suposição da radioatividade.

Fig. 104-"Pintas" verde-azuladas(nícois paralelos)(x 50)

Fig. 105-"Pintas" verde-azuladas(nícois cruzados (x 50)

Fig. 106-"Pintas" reco-brindo parcialmente o diamante (x 50)

Fig. 107-"Pintas" associadas a microdis-cos (x 100)

VIII - CONCLUSÕES

A paragênese secundária, revelada pelos satélites, foi exaustivamente estudada por Hussak (1917), quando descreveu 56 espécies mineralógicas que ocorrem juntamente com o diamante, em jazidas aluvionares. Esta paragênese, que parece mais ligada a rochas metamórficas ou magmáticas ácidas, e ainda o fato de se terem encontrado inclusões de quartzo em diamantes brasileiros (Colony, 1923), fizeram com que se afastasse a hipótese da origem ultrabásica (Guimarães, 1934). No entanto, Hussak (1917), já havia ressaltado a casualidade destas associações, devidas simplesmente à semelhança das densidades dos minerais constituintes.

Os minerais satélites identificados no presente trabalho: quartzo, calcedônia, limonita, pirita, zircão, ilmenita, rutilo, granada, magnetita e cromita, foram já citados por Hussak (1917). Observou-se, entretanto, a predominância de uma ou outra destas espécies, de depósito para depósito, fato também notado por Hussak.

1. PARAGÊNESE PRIMÁRIA

A paragênese primária, obtida pelas inclusões singenéticas do diamante, pode indicar, com maior segurança, a natureza da rocha matriz, pois estes minerais, muitas vezes orientados epitaxialmente no hospedeiro, foram englobados durante a sua cristalização.

A associação dos minerais singenéticos, identificados como inclusões nos diamantes do Triângulo Mineiro: olivina (forsterita), granada (piropo) e cromoespinélio (magnesiocromita), é possível somente em rochas ultrabásicas (Deer et al., 1962), revelando, portanto, um ambiente bem diverso do sugerido pela associação secundária.

A pentlandita, considerada por Harris (1968) como inclusão e pigenética e originada pela exsolução de sulfetos mais estáveis a pressões elevadas, é também encontrada em rochas ultrabásicas, juntamente com a pirrotita, o que indica ocorrência de fenômeno análogo.

2. ESTUDO COMPARATIVO

Os diamantes do Triângulo Mineiro são, sob o ponto-de-vista morfológico, muito semelhantes aos diamantes aluvionares da África (Oubangui-Chari) (Polinard, 1923) e URSS (Sibéria) (Prokopchuk et al., 1964), onde também se verifica a predominância de cristais rombododecaédricos, com arestas curvas e faces arredondadas.

O mesmo se observa quanto às figuras de superfície. As feições superficiais mais frequentes, nos diamantes do Triângulo, são também comuns em cristais de outras procedências. No entanto, algumas destas figuras (Figuras 52 e 61 - Capítulo V), não foram ainda descritas em diamantes de outras localidades.

As propriedades espectroscópicas (absorção ao IV. ou fluorescência ao UV.) são também análogas às de outros diamantes e talvez a maior ocorrência de diamantes do tipo Ib entre as amostras do Triângulo, seja um ponto de distinção importante, pois pode indicar uma cristalização mais rápida, não permitindo a disposição do nitrogênio em plaquetas (Du Preez e Raal, 1965). No entanto, esta conclusão deve ser confirmada por estudos posteriores, que possibilitem maior certeza estatística desta frequência anômala.

A mesma semelhança se verifica com relação às inclusões minerais. Na Tabela 20, pode-se observar a correspondência dos parâmetros unitários das inclusões de diamantes russos e sul africanos, ao lado das mesmas constantes, determinadas nas amostras do Triângulo Mineiro.

Tabela 20

Parâmetros unitários das inclusões de diamante

Inclusão	Parâmetro Unitário (Å)	África	URSS	Triângulo Mineiro
Olivina	a_o	4,73-4,74	4,70-4,78	4,75-4,77
	b_o	10,21-10,22	10,25-10,32	10,19-10,23
	c_o	5,99-6,01	5,99-6,05	5,98-6,01
Granada	a_o	11,50-11,65	11,51-11,84	11,51-11,65
Cromita	a_o	8,29-8,5	8,28-8,31	8,30-8,35

3. CONSIDERAÇÕES SÔBRE A ORIGEM

A paragênese primária e a grande analogia com os diamantes de outras ocorrências no estrangeiro, cuja origem já está estabelecida, sugere que os diamantes do Triângulo tenham igualmente origem semelhante, e a ocorrência de rochas ultrabásicas na região (Formação Patos), poderia talvez ligar-se, direta ou indiretamente, aos processos genéticos do diamante.

A presença de formas arredondadas, denotando a dissolução na tural do diamante, pode indicar, de outro lado, que a composição química do magma original deva ter-se alterado, tornando o ambiente suficientemente oxidante, propiciando a corrosão. As mesmas formas poderiam também ter-se originado por flutuações da pressão, durante o processo de desenvolvimento.

Podem-se, ainda, estimar as condições de pressão e temperatura, no momento da cristalização, através da paragênese primária. A ocorrência, num mesmo hospedeiro, de cristais de olivina, ao lado de granada ou cromoespinélio (Figura 108 e Figura 109), faz sugerir que o sistema:

esteja em equilíbrio, o que se pode confirmar, também, pelas observações de Harris (1968). Este Autor já havia notado, além das associações acima citadas, a ocorrência de olivina, juntamente com enstatita, o que indica o equilíbrio

A variedade polimórfica da sílica estável a altas pressões, encontrada em diamantes africanos, deve ocorrer também nos diamantes do Triângulo Mineiro.

Desta forma, a curva de equilíbrio, construída com base na equação termodinâmica

$$\Delta G_T^P = (\Delta H)_{298}^0 - T(\Delta S)_{298}^0 + P\Delta V = 0$$

onde:

$$\Delta G_T^P = \text{entalpia livre}$$

$$(\Delta H)_{298}^0 = \text{diferença de entalpia de reação}$$

$$(\Delta S)_{298}^0 = \text{diferença de entropia de reação}$$

$$\Delta V = \text{diferença de volumes molares,}$$

pode fornecer as condições de pressão e temperatura sob as quais o diamante se formou.

Fig. 108-Inclusões de olivina (A) e chromoespinélio (x 75)

Fig. 109-Inclusões de olivina (A) e granada (x 40)

Infelizmente, as constantes termodinâmicas do piropo, ainda não citadas na literatura, impediu estimar estas condições. O cálculo efetuado com as constantes correspondentes à grossulária, acusou pressões e temperaturas absurdas, extremamente elevadas. Contudo, as pressões ideais requeridas para a síntese do piropo, ao redor de 10 a 30 Kbars (Deer et al., 1962), podem indicar que o equilíbrio considerado sòmente se verifique em pressões análogamente altas, o que concorda com as condições necessárias para a síntese do diamante.

IX. AGRADECIMENTOS

A realização dêste trabalho tornou-se possível com a colaboração de muitos - pessoas e instituições - que, direta ou indiretamente, auxiliaram durante a sua execução, razão pela qual o autor deseja, aqui, registrar os seus agradecimentos e, em especial, ao orientador do presente, Prof. Dr. William Gerson Rolim de Camargo, da Cadeira de Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, não só pela orientação, como também pela dedicação e incentivo, durante o curso de formação e estágios de aperfeiçoamento.

Ao Prof. Waldemar Saffioti, do Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara, somos imensamente gratos pelas valiosas críticas e sugestões, além de contribuir para a realização de nosso estágio, junto à Cadeira de Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Devemos também assinalar, aqui, a compreensão irrestrita dos colegas, tanto do Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara, como os da Cadeira de Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, que nos aliviaram de toda a carga burocrática, durante a execução das pesquisas.

Contribuíram com sugestões oportunas, o Prof. Dr. Raymond Kern, da Universidade de Marseille; Prof. Dr. S. Caticha-Ellis, do Instituto de Energia Atômica de São Paulo; Drs. Kenkichi Fujimori e José Vicente Valarelli, da Cadeira de Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, e Químico Antonio Carlos Massabni, da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara, aos quais queremos externar o nosso reconhecimento.

O Prof. Dr. Arahy Badini Tavares, do Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara, auxiliou no estudo interferométrico, facultando-nos, ainda, o seu laboratório. Na confecção dos diagramas de absorção IV. contamos com a preciosa colaboração e orientação do Dr. Germinio Nazario e da Srta. Myrian Toledo, do Instituto Adolpho Lutz, e o Eng^o Rolf Hundertmark, da Inbelsa S.A., foi

o responsável pela análise na microsonda de Castaing.

Nas viagens de coleta de material tivemos a valiosa companhia do Geólogo Irineu Marques Souza e Sr. Italo Bello, do Departamento de Mineralogia e Petrologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. A tradução de original do idioma russo foi possível com a colaboração do Prof. Dr. Salomão Tabak, do Departamento de Química da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Araraquara. A revisão do texto esteve a cargo de meu pai, Prof. Dr. Manoel Cerqueira Leite, a quem devemos, também, toda a formação básica, e a apresentação gráfica é produto da colaboração do Sr. Luís Gonzaga Rocha Leite, da Denison Propaganda, que foi o autor da capa, e do Sr. José Ponchirolli, responsável pela datilografia do texto.

Os auxílios financeiros que tornaram possível o presente estudo foram cedidos pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Conselho Nacional de Pesquisas (C.N.Pq) e pela Coordeção do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que auxiliou através de bolsa concedida ao autor.

X. BIBLIOGRAFIA

- ASTM (1965) - American Society for Testing and Materials - X-Ray powder Diffraction File - Philadelphia, U.S.A.
- AZAROFF, L. V. e BUEGER, M. J. (1959) - The powder method in x-ray crystallography - McGraw Hill Book Co. New York, 342 pp.
- BARBOSA, O. (1938) - O diamante Minas Gerais - Min. Met. v. III, p. 69.
- BECKENKAMP, J. (1926) - Zur Symmetrie des Diamanten - N. Jahrb. Min. B. B. 54A, pp. 63-71.
- BERMAN, R. (1964) - Thermal properties of diamonds - Diamond Research 1964, pp. 10-13
- BEZRUKOV, G. N., BUTUZOV, V. P. e KOROLEV, D. P. (1966) - Some crystallographic features on synthetic and natural diamond - Acta Cryst. v. 21, p. A257.
- BIJVOET, J. M. (1951) - Diamond (editor) - Inorganic compounds, Section II, Structure Reports, v. 11, pp. 187-197.
- BOBRYEVICH, A. P., BONDARENKO, M. N., KRASOV, L. M., SMIRNOV, G. I. e VURKEVICH, R. K. (1959) - Diamond deposits of Yakutya - State sci-techn. publ. Lit. on geol. and prot. min. Moscow - Min. Abs. v. 14, p. 461.
- BÔA NOVA, F. (1932) - Pesquisas de platina em Coromandel - Ser. Geol. Min. Relatório Anual do Diretor, ano de 1931, pp. 73-75.
- BOVENKERK, H. P. (1961) - Some observations on the morphology and physical characteristics of synthetic diamond - Amer. Mineral. v. 46, pp. 952-963.
- BRAGG, W. H. e BRAGG, W. L. (1913) - The structure of diamond - Proc. Roy. Soc. Lond. v. 89A, p. 277 - Citado por Williams (1932).
- BUEGER, M. J. (1945) - The genesis of twin crystals - Amer. Mineral. v. 30, pp. 469-482.
- BUEGER, M. J. (1956) - Elementary Crystallography - John Wiley e Sons, New York, 528 pp.
- BUEGER, M. J. (1964) - The precession method in x-ray crystallography - John Wiley e Sons, New York, 276 pp.
- BUNTING, E. N. e VAN VALKENBURG, A. (1958) - Some properties of diamond - Amer. Mineral. v. 43, pp. 102-106.

- CAMARGO, W.G.R. e SVISERO, D. (1966) - Uma nova câmara de pó para difração de raios X - An.Acad.Brasil.Ciênc., v.40, pp.71-75.
- CAMARGO, W.G.R. e LEITE, C.R. (1967) - Nova técnica para a determinação do retículo recíproco na câmara de precessão - Ciência e Cultura, v.19, p.254.
- CAMARGO, W.G.R. e LEITE, C.R. (1968) - Inclusões em diamantes brasileiros - olivina - An.Acad.Brasil.Ciênc., v.40, Suplemento, pp.89-92.
- CAMARGO, W.G.R. e LEITE, C.R. (1969) - Olivine epitaxy in Brazilian diamonds - VII International Congress of Crystallography, Stony Brook, New York, U.S.A.
- CAMARGO, W.G.R. e INGLEZ, A.G. (1967) - Determination of unit cell dimensions by a graphic analytical method - Annual Meeting, Am. Cryst.Ass., Atlanta, Georgia.
- CAMARGO, W.G.R., LEITE, C.R. e SOUZA, I.M. (1969) - Determinação precisa de parâmetros unitários na câmara de precessão (no prelo).
- CAMPOS, L.F.G.de (1891) - Jazidas diamantíferas de Água Suja (Bagagem), Minas Gerais - Tipografia Cia. Ed. Fluminense, Rio de Janeiro, 52 pp. - Citado por Derby (1898).
- CATICA-ELLIS, S. e COCHRAN, W. (1958) - The x-ray diffraction spikes of diamond - Acta Cryst., v.11, pp.245-249.
- CHARETTE, J.J. (1961) - Infrared spectra of synthetic diamond - Journ. Chem.Phys., v.35, pp.1906-1907.
- CHESLEY, F.J. (1942) - Investigation of minor elements in diamond - Amer. Mineral., v.27, pp.20-36.
- COLONY, R.J. (1923) - An unusual quartz-diamond intergrowth - Amer. Journ.Sci., 5th series, v.5, pp.400-403.
- CUSTERS, J.F.H. (1952) - Physica, v.18, p.489 - Citado por Mitchell (1964).
- DANA, E.S. (1920?) - The System of Mineralogy: Descriptive Mineralogy - Sixth edition - New York, John Wiley e Sons, 1.134(+310)pp.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A. e ZUSSMAN, J. (1952) - Rock forming minerals, v.I, John Wiley e Sons, New York, 333 pp.
- DENNING, R.M. (1953) - Directional grinding hardness in diamond - Amer. Mineral., v.38, pp.108-117 e v.40, pp.186-191.
- DERBY, O.A. (1882) - Modes of occurrence of the Diamond in Brazil - Amer.Journ.Sci., 3rd series, v.24, pp.34-42.

- DERBY, O. A. (1898) - Brazilian evidence on the genesis of the diamond - Journ. Geol., v. 6, pp. 121-146.
- DU PREEZ, L. e RAAL, F. A. (1965) - Nitrogen in diamond - Diamond Research 1965, pp. 6-9.
- ELLIOT, R. J. (1960) - Proc. Phys. Soc., v. 76, p. 787 - Citado por Du Preez e Raal (1965).
- ERGUN, S. e ALEXANDER, L. E. (1967) - Hexagonal diamonds in meteorites - Science, v. 156, pp. 1770-1771. - Ind. Diam. Abst., v. 28, p. 183.
- EPPLER, W. F. (1961) - Inclusions in diamond - Journ. Gemmology, v. 8, pp. 1-3 -(Gemologia, n. 26, pp. 3-15).
- EVANS, T. e PHAAL, C. (1962) - Imperfections in type I and type II diamonds - Proc. Roy. Soc. Lond., v. 270A, pp. 538-552.
- FERSMAN, A. von e GOLDSCHMIDT, V. (1911) - Der Diamant - Carl Winters, Heidelberg, 274 pp. - Citado por Williams (1932).
- FISCHER, R. B. (1961) - The "Balas" from of diamond - Nature, v. 189, p. 50.
- FREYBERG, B. von (1932) - Ergebnisse geologischer Forschungen in Minas Geraes (Brasilien) - N. Jahrb. Min. Geol. Sond. II, XI, p. 401. (Resultado das pesquisas geológicas em Minas Gerais - XIX Congresso Brasileiro de Geologia - Simpósio das formações eopaleozóicas do Brasil; 1965 - Edição mimeografada traduzida por J. M. Campos).
- FREYBERG, B. von (1934) - Die Bodenschätze des Staates Minas Geraes (Brasilien) - E. Schroeizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 453 pp.
- FRIEDEL, G. (1923) - Sur les inclusions noires contenus dans les diamants du Cap. Compt. Rend. Acad. Sci. Paris, v. 177, pp. 1085-1087, Min. Abst., v. 2, p. 234.
- FRIEDEL, G. (1932) - Contribution à l'étude du diamant - Zeits. Krist. v. 83, pp. 42-55.
- FUTERGENDLER, S. I. (1956) - The study of inclusions in diamonds by the method of x-ray structural analysis - Zap. Vses. Miner. Obshch. v. 85, pp. 568-569, Min. Abst., v. 14, p. 121.
- FUTERGENDLER, S. I. (1958) - X-ray study of solid inclusions in diamonds - Soviet. Phys. Crystallography, v. 3, pp. 494-497.
- FUTERGENDLER, S. I. e FRANK-KAMENETSKII, V. A. (1961) - Oriented growth of olivine, garnet and chrome-spinel in diamond - Mem. All-Union Min. Soc., v. 90, pp. 230-236, Min. Abst., v. 16, p. 437.
- GIARDINI, A. A. e MITCHELL, R. S. (1953) - Oriented olivine in diamonds Amer. Mineral., v. 38, pp. 136-138.

- GNEVUSHEV, M.A. e NIKOLAEVA, E.S. (1958) - Diamonds of Yakutia - Min.Sborník Geol.Soc.Lvov, v.12, pp.440-442, Min.Abst., v.18, p.102.
- GNEVUSHEV, M.A. e NIKOLAEVA, E.S. (1961) - Trudy.Ya.F.S.O.Akad. Nauk. SSSR Serv.Geol., pp.97-105 - Citado por Harris (1968).
- GNEVUSHEV, M.A. e KRAVSTOV, Ya.M. (1961) - The composition of impurities in Ural and Yakutsk diamonds - Doklady Acad.Sci.URSS, Earth Sci.Sect.v.130, pp.154-156.
- GNEVUSHEV, M.A. e FUTERGENDLER, S.I. (1963) - Zap. Vses.Obshch., v.92, p.617 - Citado por Harris, 1968.
- GOLDSCHMIDT, V. (1916). - Atlas der Krystallformen, v.III - Carl Winters, Heidelberg.
- GUBELIN, E. (1952) - Inclusions in diamond - Journ.Gemmology, Lond., v.3, pp.175-187.
- GUIMARÃES, D. (1931) - Petrografia e mineralogia - Serv.Geol.Min., Relatório Anual do Diretor, Ano 1930, pp.25-28.
- GUIMARÃES, D. (1932) - Sobre a rocha matriz do diamante de Minas Gerais, Brasil - An.Acad.Brasil.Ciênc., v.4, pp.173-176.
- GUIMARÃES, D. (1934) - À margem de "os satélites do diamante" - Monogr.Serv.Geol.Minas Gerais, n.2, 59 pp.
- GUIMARÃES, D. (1965) - Princípios da metalogênese e geologia econômica do Brasil - Dep.Nac.Prod.Min.(DFPM), Bol.121, pp.540-579.
- HALPERIN, A. (1956) - Densities of trigons and ultra-violet absorption of diamonds - Acta Cryst., v.9, pp.265-268.
- HANAY, J.B. (1880) - Proc.Roy.Soc., v.30, p.188 - Citado por Simon (1968b).
- HARRIS, J.W. (1966) - The relative orientation of solid mineral inclusions in diamond - IMA Simposia Proceedings, pp.163-168.
- HARRIS, J.W., HENRIQUES, R. e MEYER, H.O.A. (1966) - Orientation of silicate inclusions in natural diamonds - Acta Cryst., v.21, p.A259.
- HARRIS, J.W. (1968) - The recognition of diamond inclusions - Part I (Syngenetic inclusions), Ind.Diam.Rev., v.28, pp.402-410. Part II (Epigenetic inclusions), Ind.Diam.Rev., v.28, pp.458-461.
- HARTMAN, P. (1953) - Relations between structure and morphology of crystals - Tese de Doutorado, Univ.Groningen, 158 pp.
- HARTMAN, P. (1954) - A discussion on "oriented olivine inclusions in diamond" - Amer.Mineral., v.39, pp.674-675.

- HARTMAN, P. e PERDOK, W.G. (1955) - Relations between morphology and structure of crystals - *Acta Cryst.*, v. 8, pp. 49-52, 521-524 e 525-529.
- HASUI, Y. (1967) - Geologia das formações cretáceas do Oeste de Minas Gerais - Tese de Doutorado - Escola Politécnica da U.S.P., 87 pp.
- HOERNI, J.A. e WOOSTER, W.A. (1955) - The X-ray anomalous reflections from diamond - *Acta Cryst.*, v. 8, pp. 187-194.
- HUSSAK, E. (1894) - Sobre o depósito diamantífero de Água Suja, perto de Bagagem, MG - Com. Exp. Planalto Central do Brasil, Relatório, Anexo 5, p. 281, Rio de Janeiro - Citado por Derby (1898).
- HUSSAK, E. (1906) - ^{II}Über die Diamantlagerstätten in Western des Staates Minas Geraes und der angrenzenden Staaten São Paulo und Goyaz, Brasilien - *Zeitschr. f. prakt. Geol.* XIV, pp. 318-333 - Citado por Freyberg (1932).
- HUSSAK, E. (1917) - Os satélites do diamante - *Serv. Geol. Min.*, Rio de Janeiro, 56 pp. - Trad. de J.B. de Araujo Ferraz.
- KAISER, W. e BOND, W.L. (1959) - *Phys. Rev.*, v. 115, p. 857 - Citado por Du Preez e Raal (1965).
- KRAUS, E.H. e SLAWSON, C.B. (1939) - Variation of hardness in the diamond - *Amer. Mineral.*, v. 24, pp. 661-676.
- LANG, A.R. (1959) - The projection topograph: a new method in X-ray microradiography - *Acta Cryst.*, v. 12, pp. 249-250.
- LEINZ, V. (1939) - Der Diamant "Presidente Vargas" - *Zentr. Min. Abt. A*, p. 99 - (*Min. Met.*, v. III, pp. 185-186).
- LEINZ, V. e SOUZA CAMPOS, J. E. (1968) - Guia para determinação de minerais - *Comp. Ed. Nacional*, 4^a ed. 140 pp.
- LEONARDOS, O.H. e SALDANHA, R. (1939) - Diamante "Darcy Vargas" e outros grandes diamantes brasileiros - *Bol. Fac. Fil. Ciênc. Let. USP* n. 18 (*Mineralogia* 3), pp. 3-25.
- LEONARDOS, O.H. (1956) - Recursos minerais do Triângulo Mineiro - *Min. Met.*, v. 24, pp. 11-77.
- MAACK, R. (1926) - Eine Forschungsreise über das Hochland von Minas Geraes zum Paranyhyba - *Zeits. d. Gesel. f. Erd. Berlín*, pp. 310-323 - Citado por Freyberg (1932).
- MAACK, R. (1932) - ^{II}Über den geologischen Bau Hochplateaus von West Minas - *Zeits. d. Gesel. f. Erd.*, Berlín, Heft 7/8, pp. 299-306 - Citado por Guimarães (1934).

- MATHUR, S.M. (1962) - Geology of the Panna diamond deposits - Rec. Geol. Survey India, v. 87, pp. 787-818, Min. Abst., v. 16, p. 48.
- MYKOLAJEWYCZ, R., KALNAJS, J. e SMAKULA, A. (1964) - High precision density determinations of natural diamonds - Journ. Appl. Phys., v. 35, pp. 1773-1778 - Min. Abst., v. 17, p. 164.
- MILLEDGE, H.J. (1961) - Coesite as an inclusion in G. E. C. synthetic diamonds - Nature, v. 190, p. 1181.
- MITCHELL, E.W.J. (1964) - The optical properties of diamond - Diamond Research 1964, pp. 13-16.
- MOISSAN, H. (1894) - Comp. Rend. Acad. Sci. Paris, v. 118, p. 320 - Citado por Simon (1968b).
- NOMARSKI, G. e WEILL, A.R. (1955) - Application à la métallographie des méthodes interférentielles à deux ondes polarisées - Revue de Métallurgie, v. 52, pp. 121-134 - Catálogo Reichert (Viena), polarization interferometer after Nomarski.
- OMAR, M. e KENAWI, M. (1957) - The etching of diamonds by low pressure oxygen - Phil. Mag., v. 8, pp. 859-863, Min. Abst., v. 14, p. 122.
- ORLOV, Yu. L. (1959) - Syngenetic and epigenetic inclusions in the crystals of diamond - Trans. Min. Mus. Acad. Sci. URSS, v. 10, pp. 103-120.
- PALACHE, C. (1932) - Multiple twins of diamond and spharelite - Amer. Mineral., v. 17, pp. 360-361.
- PATEL, A.R. e RAMACHANDRAN, N. (1968) - Growth spirals on octahedral faces of synthetic diamond - Ind. Diam. Rev., v. 28, pp. 127-129.
- PATEL, A.R. e AGARWAL, M.K. (1965) - Microstructures on Panna diamond surfaces - Amer. Mineral., v. 50, pp. 124-131.
- POEN, O. (1959) - Microprojection with x-rays - Martinus Nijhoff, The Hague, 132 pp.
- POINTDEXTER, E. (1955) - Piezobirefringence in diamond - Amer. Mineral., v. 40, pp. 1032-1054.
- POLINARD, E. (1932) - Les formes cristallines des diamants de L'Oubangui-Chari - Bull. Soc. Fra. Min., v. 55, pp. 213-235.
- PROKOPCHUK, B.I., SERGIYENKO, V.M. e MAKAROVA, N.V. (1964) - Diamonds from the North-eastern Siberian platform (diamond bearing region near the Lena) - Doklady Akad. Nauk. SSSR, v. 154, pp. 101-103.
- RAAL, F.A. (1957) - A spectrographic study of the minor element content of diamond - Amer. Mineral., v. 42, pp. 354-361.

- REIS, E. (1959) - Os grandes diamantes brasileiros - Div. Geol. Min. DNPM, n. 191, 65 pp.
- RIMANN, E. (1915) - Über Kimberlit und Alnöit in Brasilien - Tscherm. Min. Petr. Mitt., v. 33, pp. 244-262.
- RIMANN, E. (1917) - Über das Muttergestein der Diamanten Brasiliens - Tscherm. Min. Petr. Mitt., v. 34, pp. 255-261.
- RIMANN, E. (1931) - ^{II}Über das Muttergestein der Diamanten von Minas Geraes (Brasilien) - Fortschr. Min. Krist. Petr., v. 16, pp. 93-96.
- ROBERTSON, R., FOX, J. J. e MARTIN, A. E. (1934) - Two types of diamond - Phil. Trans. Roy. Soc., v. A 232, p. 463 - Citado por Mitchell (1964).
- ROSENFELD, J. L. (1950) - Determination of all principal indices of refraction on difficultly oriented minerals by direct measurement - Amer. Mineral., v. 35, pp. 902-905.
- ROSSINI, F. D., WAGMAN, D. D., EVANS, W. H., LEVINE, S. e JAFFE, I. (1952) - Nat. Bur. Standard, Circular 500 - Citado por Simon (1968b).
- SALDANHA, R. (1941) - O diamante Coromandel - Bol. Fac. Fil. Ciênc. Let., USP, nº 21 (Mineralogia 4), pp. 15-23.
- SALDANHA, R. (1942) - O diamante "Governador Valadares" - Bol. Fac. Fil. Ciênc. Let., USP, nº 30 (Mineralogia 5), pp. 17-23.
- SEAL, M. (1962) - The surface structure of diamonds - Gems and Gemology, v. 10, pp. 309-314.
- SEAL, M. (1965) - Structure in diamonds as revealed by etching - Amer. Mineral., v. 50, pp. 105-123.
- SEAL, M. (1968) - Diamond - as a crystal and as an industrial material - Ind. Diam. Rev., v. 28, pp. 104-110.
- SHAH, C. J. e LANG, A. R. (1963) - An unusual distribution of precipitates in a diamond - Min. Mag., v. 33, pp. 594-599.
- SHARP, W. E. (1966) - Pyrrhotite: a common inclusion in South-African diamonds - Nature, v. 211, pp. 402-403.
- SIMON, B. (1968a) - Contribution à l'étude de la formation des macles de croissance - Tese de Doutorado (Primeira Tese), Universidade de Marseille, 149 pp.
- SIMON, B. (1968b) - La synthèse du diamant - Tese de Doutorado (Segunda Tese), Universidade de Marseille, 11 pp.
- SLAWSON, C. B. (1950) - Twinning in the diamond - Amer. Mineral., v. 35, pp. 193-206.

- SMITH, W. V., SOROKIN, P. P., GELLES, I. L. e LASHER, G. J. (1959)
- Phys. Rev., v. 115, p. 1546 - Citado por Du Preez e Raal (1965).
- SPENCER, L. J. (1924) - An inclusion of magnetite in diamond - Min.
Mag., v. 20, pp. 245-247.
- SRIRAMADAS, A. (1957) - Diagrams for the correlation of unit cell edges
and refractive indices with the chemical composition of garnets -
Amer. Mineral., v. 42, pp. 294-298.
- SUTHERLAND, G. B. B. M., BLACKWELL, P. E. e SIMERAL, W. G. (1954)
- The problem of the two types of diamond - Nature, v. 174, pp. 901-
-904.
- SUTTON, J. R. (1921) - Inclusions in diamond from South Africa - Min.
Mag., v. 19, pp. 208-210.
- TOLANSKY, S. e SUNAGAWA, I. (1959) - Spiral and other growth forms
of synthetic diamonds: a distinction between natural and synthetic
diamonds - Nature, v. 184, pp. 1526-1527.
- TOLANSKY, S. (1960) - Surface Microtopography - Longmans, London,
296 pp.
- TOLANSKY, S. (1966) - Birrefringence of diamond - Nature, v. 211, pp.
158-160.
- TOLANSKY, S. e KOMATSU, H. (1967) - Abundance of type II diamonds
- Science, v. 157, pp. 1173-1175, Ind. Diam. Abst., v. 28, p. 183.
- UREY, H. C., MELE, A. e MAYEDA, T. (1957) - Diamonds in stone me-
teorites - Geochim. Cosm. Acta, v. 13, pp. 1-4.
- VALARELLI, J. V. (1963) - Morfologia de um cristal de diamante - Gemo-
logia, n. 31, pp. 1-6.
- WAGNER, P. A. (1914) - The diamond fields of Southern Africa - Johan-
nesburg - Citado por Harris (1968).
- WEDEPHOL, P. T. (1957) - Electrical and optical properties of type IIb
diamonds - Proc. Phys. Soc. Lond., v. 70B, pp. 177-185.
- WILLIAMS, A. F. (1932) - The genesis of diamond. V. II - Ernest Benn,
London, 536 pp.
- YODER, H. S. e SAHAMA, T. H. G. (1957) - Olivine x-ray determinative
curve - Amer. Mineral., v. 42, pp. 475-491.