

17. Diamante

Mario Jorge Costa¹
Adão Benvindo da Luz²

1. INTRODUÇÃO

Os diamantes foram supostamente descobertos na Índia, vários séculos antes de Cristo conforme registros encontrados nos textos Sânscritos “Arthasastra e Ratnapariska”, citados por Legran, 1984 (Janse, 1996).

Até o século XVII, a Índia era praticamente o único país produtor mundial de diamante, segundo relato do francês Tavernier, nas suas diversas viagens ao Oriente, sobre as minas diamantíferas da Região de Kurnool, na Índia (Barbosa, 1991).

Segundo Barbosa (1991), o primeiro diamante, no Brasil, foi encontrado por Francisco Machado da Silva, no ano de 1714, num garimpo de ouro denominado de São Pedro, córrego do Machado ou Pinheiro, próximo a Diamantina-MG. A partir de Diamantina, novas e importantes descobertas irradiaram-se para diversos distritos do país; para norte, na Chapada Diamantina (Bahia); para sul, nas regiões de Coromandel e Alto Paranaíba (Minas Gerais e Goiás) e para oeste nas regiões de Poxoreu e Alto Paraguai, no Mato Grosso. Todas as regiões produtoras de diamantes no Brasil, inclusive as de descobertas mais recentes (por exemplo Juína, MT), guardam até hoje um ponto comum: todos os depósitos são secundários, restritos a aluviões, coluviões, terraços, geologicamente antigos ou recentes. Não há registro de produção de diamantes no Brasil, até hoje, oriundos de depósitos primários (kimberlitos, *latu sensu*).

A partir das descobertas de Diamantina, o Brasil passou a ocupar o primeiro lugar como produtor mundial de diamantes, desbancando a Índia, posição que manteve por cerca de 150 anos. Estima-se que neste período tenham sido produzidos cerca de 13 milhões de quilates de diamantes de qualidade, isto é equivalente a duas toneladas métricas de gemas (Cassedanne, 1989).

¹ Geólogo/UFPE, M.Sc./Leicester University, Inglaterra, Consultor/MJC Consultoria de Geologia Ltda

² Eng. de Minas/UFPE, Dr. Engenharia Mineral/USP, Pesquisador Titular do CETEM/MCT

O primeiro relato da descoberta de diamantes na África do Sul refere-se a um diamante de 21,25 quilates encontrado por Erasmus Jacobs, na fazenda De Kalk, situada na margem esquerda do Rio Orange, em julho de 1866 (Janse, 1995). As primeiras descobertas limitaram-se aos terraços e aluviões dos rios Orange e Vaal e desencandearam a primeira “corrida” de prospectores e “garimpeiros” na África do Sul, cuja produção rapidamente ultrapassou o Brasil como fonte preferencial destas gemas. Ainda segundo Janse (op. cit.), já em 1870, diamantes eram encontrados fora das aluviões e terraços dos rios, nos chamados “*Dry Diggings*”. As gemas ocorriam em terrenos argilosos de cor amarela, logo nomeados pelos prospectores como “*yellow ground*” e que veio a ser posteriormente reconhecido como o saprolito de kimberlitos. Subjacente ao *yellow ground*, sempre surgiam rochas duras, de coloração cinza-azulada, logo batizadas de “*blue ground*”, também portadoras de diamantes.

Nestes terrenos os prospectores e mineradores foram aprofundando as escavações, obtendo surpreendentes produções de diamantes. As duas primeiras grandes “minas”, ou “pipes”, assim chamados devido à forma cilíndrica vertical, desenvolveram-se nos locais denominados Bultfontein e Dutoitspan, nos arredores da cidade de Kimberley, então um desorganizado acampamento de mineiros.

Em 1954, a empresa General Electric conseguiu produzir, comercialmente, diamantes artificiais, sob a forma de pequenos cristais para uso industrial, chegando mesmo, em 1970, a produzir gemas de até 2 quilates. A produção de diamantes destinados ao mercado joalheiro, pela rota tecnológica desenvolvida pela GE, mostrou-se contudo economicamente inviável e foi abandonada (Davis, 2003).

Hoje, o diamante sintético é produzido em 17 países, sendo que EUA, Irlanda, Rússia e África do Sul são responsáveis por 2/3 da produção mundial, correspondente a mais de 500 milhões de quilates (UENF, 2004).

Em 1987, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, produz, pela primeira vez no Brasil, o diamante sintético. No ano de 2004, a Universidade Norte Fluminense declara ter dominado a tecnologia de produção de diamante sintético, atingindo a marca de mais de 10 mil quilates (UENF, 2004).

A Nova Era dos Diamantes

Sob o título acima, Jushua Davis publicou no periódico WIRED (Setembro, 2003), um importante artigo cujo conteúdo sinaliza, pela primeira vez, a possibilidade de mudanças profundas na estrutura secular de produção e comercialização de diamantes, que pode ter reflexos irreversíveis em todos os segmentos de uma indústria, que hoje representa um movimento anual de cerca de US\$ 7 bilhões.

Duas empresas norte-americanas, trabalhando em rotas completamente diferentes, já produzem e comercializam, há cerca de dois anos, diamantes sintéticos, tanto para o segmento de joalheria (gemas), quanto para segmentos industriais de tecnologia de ponta, quebrando o antigo paradigma do uso, quase exclusivo, dos diamantes manufaturados como abrasivos ou em ferramentas de corte. As informações apresentadas, sumariamente, a seguir, podem ser acessadas pela internet nos sites: www.gemesis.com e no www.apollodiamond.com.

A empresa GEMESIS, instalada na cidade de Sarasota, Flórida, adquiriu tecnologia originalmente desenvolvida na antiga URSS e posteriormente aperfeiçoada nos Estados Unidos, com ajuda de cientistas russos liderados por um iraniano. A tecnologia, denominada “Câmara Cerâmica de Cultivo”, consegue reproduzir pressão de 58.000 atmosferas no interior da câmara, e temperaturas de 2.300 graus Fahrenheit. Nestas condições, o carbono liberado de grafite atomizada, precipita, camada por camada, em uma pequena semente de diamante previamente inserida na câmara. Os cristais produzidos pela Gemesis, de até 3 quilates, são cópias idênticas, em forma, pureza, e cor única – amarelo âmbar, e custam segundo Davis (op.cit), individualmente, menos de US\$ 100 ao fabricante. A GEMESIS pretende aumentar a sua produção ao nível equivalente de uma mina de médio porte, isto é, na escala de 1 a 2 milhões de quilates por ano.

A empresa APOLLO Diamonds Inc., de Boston, Massachusetts, produz diamantes sintéticos usando a técnica denominada “Deposição de Vapor Químico” (Chemical Vapor Deposition – CVD), patenteada nos Estados Unidos. A tecnologia CVD foi originalmente usada para produção de *wafers* (panquecas) muito finas de diamantes, para uso nas indústrias óptica, eletrônica, de nanotecnologias e aplicações avançadas. Na tecnologia CVD, se obtém diamantes vaporizando uma nuvem de plasma de carbono sobre mini *wafers* de diamantes, que fazem o papel de sementes. Já com as “sementes” colocadas em suportes no interior da câmara, a mesma é despressurizada a 1/10 de atmosfera e hidrogênio e gás natural (CH₄) são injetados. A câmara é aquecida por micro-ondas a 1.800 graus Fahrenheit e, neste ponto, os elétrons se separam dos núcleos dos átomos,

formando um plasma. Os átomos de carbono, assim liberados, se separam do plasma e se depositam sobre os *wafers* sementes, resultando na formação de “tijolos” de diamante. Os tijolos podem então ser cortados como “wafers”, para a produção de semi-condutores ou lapidados como gemas para as joalherias.

Contudo, segundo enfatiza Davis (op.cit.), o grande incentivo, tanto do ponto vista civil como militar, para o desenvolvimento da tecnologia CVD, é a indústria de computação, em particular visando o desenvolvimento de “chips” de diamante, para as futuras gerações de computadores ultra-rápidos.

O diamante é mais conhecido pelas qualidades de suas gemas, no entanto algumas de suas propriedades o tornam ideal para muitas aplicações industriais. O diamante natural é constituído de carbono, com pequenas quantidades de impurezas (< 0,2% de nitrogênio no diamante natural). O diamante sintético é produzido a partir de grafita, em alta temperatura e pressão, na presença de catalisadores de níquel ou liga de níquel (Harben, 1995; Olson, 2002).

O diamante natural industrial é adequado apenas para usos industriais tais como: corte, esmerilhamento, perfuração, trefilação e abrasivo. Devido à cor, defeitos estruturais, tamanho, forma, os diamantes industriais não atendem os requisitos para uso como gemas. O diamante é mais duro do que qualquer outro material natural ou artificial e por isto é mais eficiente do que outros abrasivos. O diamante é perfeitamente adaptável para processos de corte automatizados e polimento. Rodas de esmeril a diamante e ferramenta a diamante são usadas para afiar ferramentas de corte de carboneto e alinhamento de rodas de esmeril feitas com outros materiais abrasivos (Smoak, 1985).

Tanto o diamante natural quanto o sintético têm usos industriais, no entanto, o diamante industrial sintético apresenta vantagens em relação ao diamante natural, por ser produzido em grandes quantidades. Segundo Boucher(1996), citado por Olson (2002), as propriedades do diamante sintético podem ser projetadas para usos específicos. Neste contexto, o diamante sintético representa mais de 90% do uso industrial, no mundo.

Os EUA lideram a produção mundial de diamantes sintéticos, tendo produzido 308 milhões de quilates no ano de 2001. Dessa produção, estima-se que cerca de 10 milhões de quilates foram recuperados e reciclados a partir de coroas ou brocas de perfuração usadas na pesquisa mineral e na exploração de petróleo, ferramentas de diamante e resíduos contendo diamante (Olson, 2002).

Segundo Oliveira (2003), a produção mundial de diamantes naturais, em 2002, foi de 115 milhões de quilates e os principais produtores são: Austrália, Botswana, Rússia, Congo (Kinshasa) e África do Sul que contribuíram, em 2002, com 88% da produção de diamante e detêm 80% das reservas mundiais. A produção mundial de diamante industrial de qualidade é de cerca de 60 milhões de quilates e a produção de diamante sintético é dez vezes a de diamante natural.

Ainda segundo esse mesmo autor, a produção brasileira de diamantes naturais tem variado bastante, influenciada pela variação do dólar em relação ao real. No momento, a produção de diamante natural, no Brasil, é dominada pelo segmento de garimpagem e a produção, por parte de empresas, representa apenas 8% do total, o equivalente a 40 mil quilates, em 2002. A tendência para o futuro é de mudança nesse quadro, tendo em vista que se vem observando um número elevado de alvarás de pesquisa, de empresas nacionais e multinacionais, interessadas na descoberta de diamante em depósitos primários, do tipo kimberlitos (kimberlitos) economicamente mineralizados.

O Brasil importou, em 2002, cerca de US\$ 20 milhões em diamantes, na forma de pós de diamante de origem natural e sintética e manufaturados, com diferentes especificações. Exportou cerca de US\$ 33 milhões na forma de diamantes naturais primários e manufaturados para Bélgica, EUA, Chile e Argentina, onde os diamantes naturais representam 96% da exportação (Oliveira, 2003).

Como não se tem conhecimento da quantidade de diamante lapidada e consumida na indústria joalheira, fica muito difícil determinar o consumo nacional de diamante, estimado em 30 mil quilates, que corresponde a 25% da produção de gemas.

2. MINERALOGIA E GEOLOGIA

2.1. Geologia dos Kimberlitos

Por se tratar de uma rocha complexa, as definições de Kimberlito, descritas na literatura, são muitas vezes confusas e conflitantes. Adotamos, aqui, a definição proposta por Kjarsgaard (1996), que propõe uma adaptação e modificação das definições propostas, anteriormente, por Clement et al. (1984) e Mitchell (1986). Segundo o citado autor, Kimberlitos são rochas ricas em CO₂ e H₂O, com uma textura inequigranular distinta devido a presença de grandes macrocristais arredondados (i.e., megacristais e xenocristais), além de fenocristais euhedrais e

subhedrais imersos em uma matriz de granulometria fina. Os macrocristais incluem minerais oriundos da desagregação de xenólitos do manto, além da suíte característica de megacristais dos kimberlitos (olivina, Mg-Ilmenita, granadas piropro enriquecidas em Ti-Cr, clinopiroxênio, flogopita, enstatita e zircão).

Um fato geológico estatisticamente comprovado é que a ocorrência de kimberlitos diamantíferos é restrita a um ambiente geotectônico bem definido, especificamente em áreas de escudos pré-cambrianos antigos, tectonicamente estabilizados em idade geológica anterior a 1,5 bilhões de anos. Este conceito, estabelecido por Clifford (1966), foi consagrado, tanto na literatura quanto no jargão de exploração mineral, como *Regra* ou *Lei de Clifford*. Os fundamentos teóricos da *Regra de Clifford* baseiam-se nas restrições ou, melhor, exigências impostas pelas condições físico-químicas, necessárias à estabilidade do carbono cristalizado como diamante, no manto, que se restringe a “janelas de estabilidade” (*diamond windows*), somente possíveis nas quilhas de zonas crustais espessas, de baixo gradiente geotérmico, preservadas apenas nos núcleos cratônicos estáveis da crosta. Por exclusão, não se pesquisa kimberlitos nas faixas móveis (*mobile belts*) ou zonas que sofreram remobilizações recentes da crosta.

Kimberlitos são rochas extremamente raras (< 1% da composição da crosta) e ocorrem em “pipes” ou chaminés vulcânicas em diques e soleiras ou “sills”. Os esforços dedicados à pesquisa e mineração de kimberlitos, nas últimas décadas, em várias partes do mundo, permitiram a consolidação de novos modelos sobre a morfologia dos corpos kimberlíticos, além do modelo clássico do “pipe Sul-Africano” de Clement (1975), modificado por Mitchell (1986) *in* Kjarsgaard (Figura 1) (op.cit.).

Kjarsgaard (op.cit.) propõe modelos da morfologia de chaminés para diversos distritos kimberlíticos canadenses, entre os quais o modelo do distrito de Lac de Grás (Figura 2), que difere dos “pipes” Sul-Africanos pelo fato de serem de menor tamanho, portanto, com volumes de minério mais modestos, o que, porém, é compensado pelos teores (ct/t) bem mais elevados e pela excelente qualidade dos diamantes.

Nos campos kimberlíticos, também extraordinariamente ricos, de Daldyn-Alakit, na antiga província de Yakutia, na Sibéria–URSS, hoje chamada Shabka, ocorre, com grande frequência, um outro modelo de sistemas kimberlíticos, sob a forma de chaminés múltiplas ou gêmeas, conforme ilustrado na Figura 3.

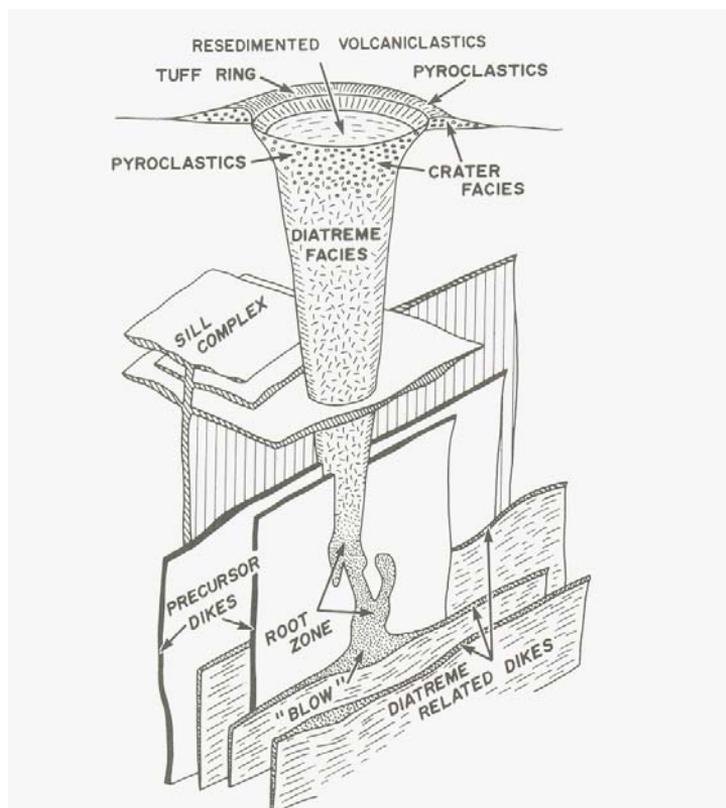


Figura 1: Modelo clássico de “pipe” kimberlítico do tipo Sul-Africano, segundo Clement (1975), modificado por Mitchel (1995).

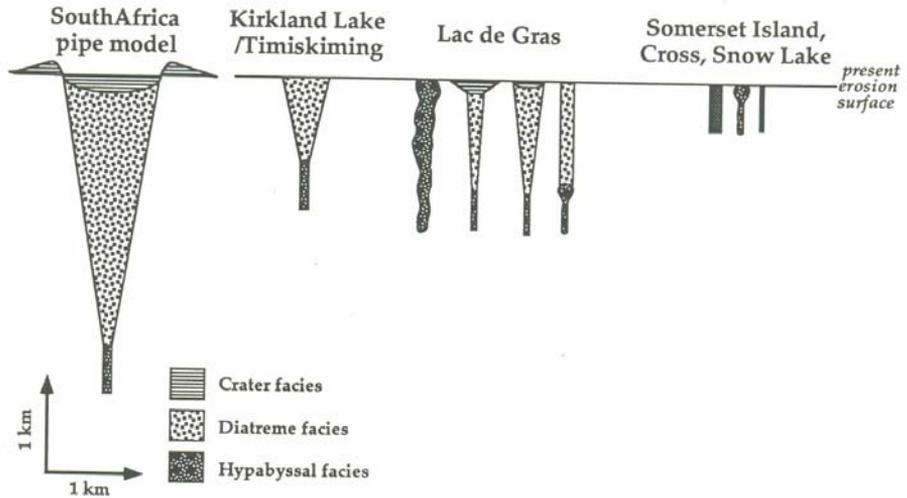


Figura 2: Comparação de modelos de “pipes” canadenses e sul-africanos, segundo Kjarsgaard (1996). O autor, citado, observa que os kimberlitos, da área de Lac de Gras (Mina Ekati), são como “miniaturas” do modelo morfológico sul-africano.

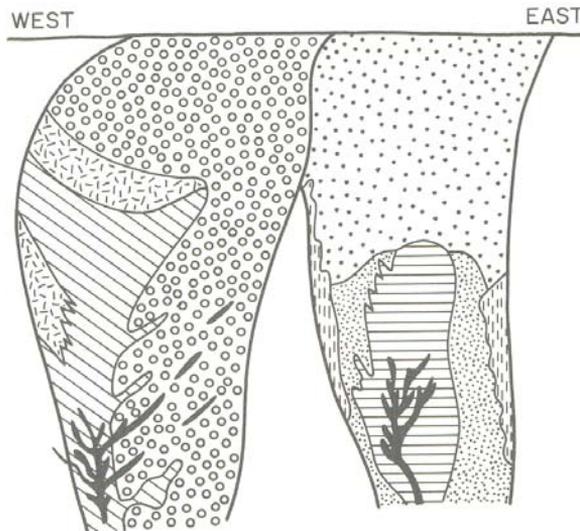


Figura 3: Seção transversal do kimberlito Udachnaya, Yakutia. Um modelo morfológico de intrusão dupla, multifásica, comum nos cratons da Sibéria. (Mitchell, 1986, citado por Mitchell, 1995).

Os novos conceitos e modelos, sobre a morfologia das intrusões kimberlíticas, tem implicações fundamentais na estratégia da pesquisa destes corpos e, em particular, no caso do Brasil, talvez explique, em parte, as razões do insucesso histórico na pesquisa de kimberlitos diamantíferos, sempre orientada pelo modelo morfológico e metodológico importado da África do Sul.

O único kimberlito diamantífero, com potencial econômico conhecido no Brasil, é o “pipe” Canastra I, localizado na extremidade nordeste da Serra da Canastra (Minas Gerais), próximo à Cachoeira das Antas, nascentes do Rio São Francisco. Esta chaminé, pesquisada pela SOPEMI (DeBEERS), é uma pequena intrusiva (0,6 ha de área), com 9 facies kimberlíticas reconhecidos, dos quais apenas quatro com valor econômico (Engo. Mário Freitas, comunicação verbal). A economicidade deste kimberlito está mais associada à qualidade superior dos diamantes do que aos teores, considerados muito baixos.

Desta forma, permanece o grande desafio de encontrar as rochas fontes (chaminés kimberlíticas) do enorme volume de diamantes de qualidade já minerados e em contínua produção no Brasil, em que pese os substanciais investimentos aqui aplicados em pesquisa, na segunda metade do século passado, por empresas multinacionais. Curiosamente, nunca fez parte dos programas de órgãos de governo no Brasil, na área mineral, isto é, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, DNPM ou outros, qualquer projeto direcionado à pesquisa de kimberlitos diamantíferos.

2.2. Mineralogia

A suíte mineralógica clássica das rochas kimberlíticas, lamproítos e outros tipos de alcalinas básicas associadas, usada como guias ou indicadores prospectivos, é apresentada, de forma simplificada, na Tabela 1, publicada por Muggeridge (1995).

Além dos minerais citados, os kimberlitos e rochas afins, por serem extremamente ricos em voláteis, geram uma complexa suíte de minerais secundários, por alteração hidrotermal e deutérica, em particular, minerais do grupo das serpentinas, carbonatos e zeólitas.

Tabela 1: Suíte mineralógica clássica das rochas kimberlíticas, lamproítos e outros usados como guias ou indicadores prospectivos (Muggeridge, 1995).

Mineral	Composição	Cor	Dureza/Densidade
GRANADA PIROPO Alto Cr, Baixo Ca	Silicato, Mg, Al, Fe, Ca, Cr, Ti.	Vermelho, rosa, amarelo, laranja.	7,5 / 3,51
PICROILMENTA Ilmen. Magnesiana	Oxido, Mg, Fe, Ti, Cr Mn, Al, Si.	Preta azulada	5-6 / 4,5-5
CROMO DIOPSÍDIO (Clinopiroxenio)	Silicato, Ca, Mg, Fe, Cr, Al, Na.	Verde Esmeralda	5-6 / 3,3-3,6
ESPINÉLIO CROMÍFERO CROMITA	Oxido, Mg, Fe, Cr, Al, Mn, Ti.	Preta	5.5 / 4,3-4,57
FILOGOPITA/MIC A	Silicato, Al, Mg, K, Fe, Ti, Cr.	Bronze, Marron Avermelhada	2,5-3 / 2,78-2,8.5
OLIVINA Forsterita	Silicato, Mg, Fe, Ni, Mn	Verde Amarelado	6-7 / 3,2-3,33
ENSTATITA/BRON ZITA (Ortopiroxenio)	Silicato, Mg, Fe, Al, Ca, Ti.	Verde Oliva, Marrom	5,5 / 3,1-3,3
ZIRCÃO	Silicato de Zr, baixo U e Th.	Incolor, Róseo, Amarelo, Marron	7, / 4,68-4,7
K RICHERITA/ Mg KATFORITA	Silicato Mg, K, Ti, Fe, Ca, Na	Vermelho, rosa, marron	5-6 / 3,09
PRIDERITA	Titanato, Fe, Ba, K	Marron avermelhado	6 / 3,86
DIAMANTE	C nativo (N, B)	Incolor, amarelo, Marron	10 / 3,52

2.3. Prospecção e Pesquisa

A prospecção e pesquisa de kimberlitos diamantíferos compreendem duas atividades distintas e complementares. A 1ª Fase, de caráter regional, abrangendo áreas com dezenas e mesmo centenas de milhares de quilômetros quadrados, tem por objetivo a identificação de corpos kimberlíticos, sejam chaminés (“pipes”), diques ou soleiras intrusivos. As áreas selecionadas para a busca são, preferencialmente, áreas cratônicas, com idade geológica superior a 1,5 bilhões de anos, em conformidade com o que recomenda a *Regra de Clifford*, já mencionada. As ferramentas de busca utilizadas incluem métodos geofísicos magnéticos, eletromagnéticos (EM), gama-cintilométricos e gravimétricos, aero-transportados em avião e ou helicóptero. Estas tecnologias, em constante evolução, são atualmente complementadas pela interpretação de imagens de satélite de alta resolução, como as fornecidas pelo satélite IKONOS (1 metro), ou pela série Indiana de satélites IRS (5 metros).

Ainda nesta fase, outra poderosa ferramenta usada, rotineiramente, nos projetos de pesquisa é a prospecção geoquímica de **minerais indicadores** (granada, ilmenita, cromita, cromo-diopsídio) através da coleta sistemática de amostras de sedimentos de corrente, na rede de drenagem da área, ou de solos (loam sampling), em malha regular estabelecida no terreno.

A avaliação do potencial ou da vocação diamantífera dos kimberlitos, eventualmente presentes na área amostrada, baseia-se na identificação mineralógica dos grãos de minerais indicadores presentes nas amostras de sedimentos ou de solo residual coletadas, seguida da análise microquímica de cada grão, em microsonda eletrônica.

A idéia de se usar minerais indicadores, na prospecção de diamantes, ou os equivalentes chamados de “satélite” ou “forma”, na terminologia dos nossos garimpeiros, é tão antiga quanto a descoberta do próprio diamante. Conforme relata o Jornalista Matthew Hart, em seu brilhante livro “DIAMOND – A Journey to the Heart of an Obsession” de 2001, somente a partir de 1980, graças às pesquisas desenvolvidas por John Gurney, na Universidade de Cape Town, África do Sul, esta técnica teve o suporte científico e adquiriu a habilidade de discriminar kimberlitos estéreis, daqueles portadores de mineralização com potencial econômico.

O trabalho de Gurney (1984), na África do Sul, seguido e complementado pelas pesquisas do Geólogo Canadense, Charles Fipke, sobre a geoquímica dos minerais indicadores, publicadas no Boletim 423 (Fipke et al., 1995) do Serviço Geológico do Canadá, representam um marco na pesquisa de diamantes, sendo um dos fatores que conduziu à descoberta das minas Canadenses e, em grande parte, às minas da antiga URSS.

Simplisticamente, a técnica consiste em se analisar a microquímica dos grãos dos minerais indicadores, em microsonda eletrônica, e plotar os resultados em certos gráficos discriminadores, de uso público. A base de toda a interpretação é estatística; portanto, quanto maior o número de grãos de cada mineral analisado, maior a confiabilidade. As **granadas** piropo de composição sub-cálcica e com alto cromo, denominadas de GRANADAS G10, são, de longe, o mais fiel indicador da presença de diamantes com potencial econômico em um kimberlito. O clássico diagrama publicado por Gurney (1984), reproduzido na Figura 4, a seguir, reflete a íntima associação das Granadas G10 com kimberlitos diamantíferos em diversos continentes.

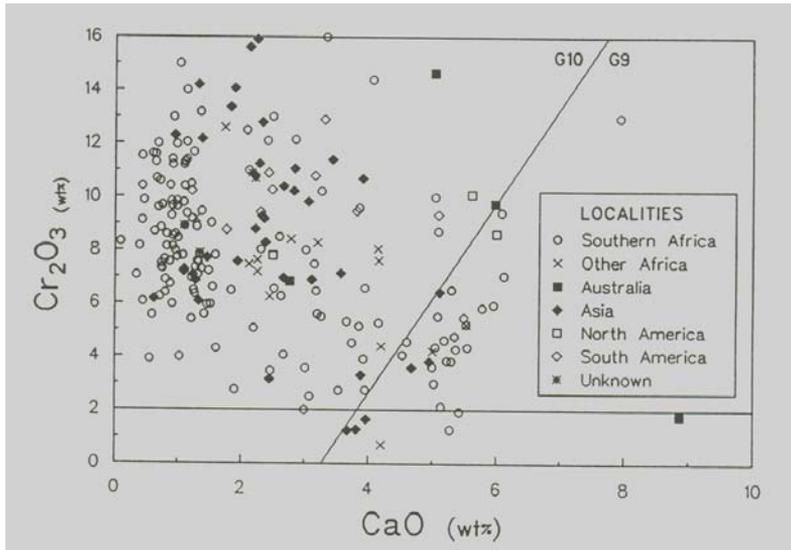


Figura 4: Diagrama Cr_2O_3 – CaO para inclusões de granadas peridotíticas de várias localidades. Oitenta e cinco por cento das granadas caem no campo pobre em Ca, em relação à linha inclinada definida por Gurney (1984). Estas granadas de composição sub-cálcica são denominadas de GRANADAS G10. GSC, Bulletin 423, 1995.

Uma vez localizado um corpo kimberlítico e provado o seu “DNA” diamantífero, inicia-se a 2ª Fase do programa de pesquisa, que tem por objetivo provar a viabilidade econômica do mesmo.

Além dos programas sistemáticos de sondagem rotativa e roto-percursiva, com o objetivo de delinear a geometria do corpo, seu volume e os diversos fácies da intrusiva, o ponto crucial da investigação é focado na definição do teor do minério, em quilates/tonelada, e na avaliação de mercado dos diamantes recuperados na pesquisa. Isto implica na necessidade de se processar amostras de grandes volumes de minério, da ordem de dezenas de milhares de toneladas, em planta piloto. Com os dois parâmetros estabelecidos, isto é, o teor em ct/t e o valor médio dos diamantes recuperados em US\$/ct, calcula-se o valor por tonelada de minério (kimberlito) *in situ*, em US\$/t. É este o parâmetro internacionalmente usado nas avaliações financeiras e de viabilidade econômica da futura mina.

3. LAVRA E BENEFICIAMENTO

Lavra

Até a descoberta do diamante em kimberlitos, na África do Sul, na segunda metade do século 19, os diamantes eram produzidos, totalmente, a partir de depósitos fluviais, por meio de lavra em cavas abertas, usando ferramentas e técnicas bastante primitivas. Picaretas e escavadeiras eram praticamente os únicos equipamentos usados na lavra. O uso de batéia e peneiras era o método de concentração utilizado, seguido de catação manual, para recuperar os diamantes contidos no concentrado de batéia (K. Reckling et al., 1994).

No caso do diamante em kimberlitos, a lavra é feita inicialmente a céu aberto até uma determinada profundidade e, a partir de então, se usa a lavra subterrânea, recorrendo a uma combinação dos métodos *shrinkage stoping* e *sublevel caving*. O minério lavrado é transportado em vagonetas até o poço, e deste até a superfície.

Segundo Barbosa (1991), o grau de mecanização da lavra, em aluvião, depende da escala de produção. No caso de garimpo ou pequena lavra, a extração do cascalho normalmente é feita por ferramentas manuais do tipo picareta, alavanca, enxadão e pá. A seguir, o minério é transportado, por carrinho de mão, para o local do tratamento. Para lavras em média ou grande escala, a mecanização deve ser completa e, neste caso, emprega-se trator e/ou draga de arrasto, pá carregadeira e caminhões. Na lavra em grande escala, em leitos de rio, é utilizada a draga de alcatruzes ou balsas com moto-bomba fazendo a sucção do cascalho para a balsa, por meio de um mergulhador. Na balsa, o cascalho é deslamado e classificado em trómel. O grosso é descartado e o passante é processado em *sluices*. Em dragas onde o beneficiamento é mais mecanizado, é comum o uso de jgues para fazer a pré-concentração do diamante, junto com os minerais pesados.

Beneficiamento

A concentração de diamantes é feita por métodos físicos e o processo industrial empregado difere, em função do tipo de minério (aluvionar ou primário), escala de produção e outros fatores.

Minério Aluvionar: no caso de minério aluvionar, este, após lavrado por monitores hidráulicos ou dragas de alcatruzes (leito de rio), é submetido, inicialmente, a uma etapa de lavagem em troméis, com peneira de abertura entre 20 e 25 mm. O retido é descartado como rejeito e o passante vai para

concentração em jígues (circulares ou Yuba). O concentrado obtido, contendo diamantes e minerais pesados, é novamente separado por tamanho, em peneiras com abertura de 1,5; 3 e 6 mm. Os grossos são novamente submetidos a concentração em jigue e os finos ($< 1,5$ mm) são descartados como rejeito. Quando os concentrados contêm minerais magnéticos e/ou condutores, são usados separadores magnéticos/eletrostáticos, para sua remoção. No caso de pequenas e médias empresas, a etapa final de concentração dos diamantes é feita por catação manual ou usando mesa ou correia de graxa (Barbosa, 1991).

Minério Primário: este é submetido a britagem, normalmente em britadores giratórios e de rolos, de forma a evitar o impacto sobre os diamantes, já que estes, apesar de sua elevada dureza, são quebradiços devido à sua clivagem perfeita. Atrição e moagem de bolas são também usados posteriormente, visando a liberação da ganga das pedras de diamante. A pré-concentração é feita em painéis lavadoras de diamante (*diamond washing pan*), jígues, separadores em meio denso (ciclone ou dynawhirlpool). A concentração final para obtenção dos diamantes é feita em separadores magnéticos/eletrostáticos, mesa ou correia de graxa, separadores ópticos ou a raios-X. A seguir, os diamantes recuperados são classificados, baseado nos quatro *C*: *color* (cor), *clarity* (limpidez), *carat* (peso em quilate) e *cut* (lapidabilidade). Na Figura 5 encontra-se um fluxograma para beneficiamento de um minério de diamante duro (primário) e intemperizado.

Nas empresas de maior porte, os jígues foram substituídos por separadores de meio denso, do tipo ciclone de meio denso ou dynawhirlpool. As mesas de graxa usadas na recuperação final dos diamantes estão também sendo substituídas por separadores ópticos e a raios-X, dependendo do tipo, forma e tamanho dos diamantes presentes (Barbosa, 1991; Smoak, 1985).

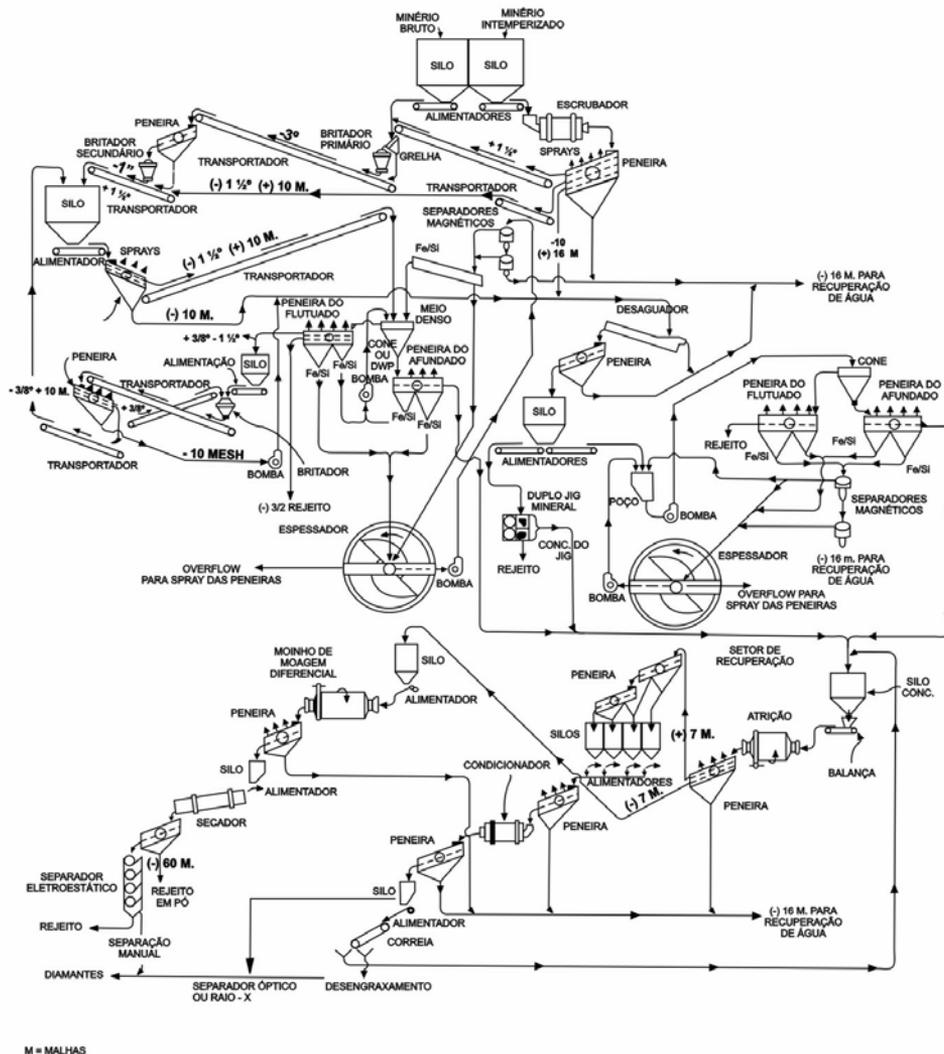


Figura 5: Fluxograma de beneficiamento de diamante (K. Reckling *et al.*, 1994, adaptado) para minérios duros e intemperizados.

4. USOS E FUNÇÕES

O diamante natural é usado comercialmente: i) como gema, no mercado de jóias e ii) como diamante industrial.

Possivelmente, o primeiro uso industrial do diamante foi na forma de pó, para polimento de gemas de diamante e outras pedras preciosas. A técnica de polimento e corte do diamante foi desenvolvida na Índia, antes de 1400. Até o ano de 1860, o principal uso do diamante era para cortar vidro. O uso do diamante para cortar metal, data de 1860, no entanto, o elevado preço das ferramentas de diamante constituiu-se numa desvantagem para sua aceitação. Quando as vantagens em usar diamante se tornaram conhecidas, aumentou a sua demanda (Smoak, 1985).

Segundo ainda esse mesmo autor, a broca a diamante foi usada pela primeira vez na África do Sul. Com a descoberta do diamante neste país, em 1867, criaram-se as condições para o suprimento de diamante e observou-se um aumento da sua demanda para brocas de perfuração. Os diferentes usos do diamante incluem (Olson, 2002):

- Cortador de vidro;
- Serras diamantadas;
- Coroas diamantadas para sondagem na pesquisa mineral;
- Corte de rochas ornamentais;
- Brocas de perfuração de poços de petróleo;
- Inspeção de concreto em diferentes estruturas;
- Manufatura de máquinas;
- Manufatura de peças de refratário para revestimento de forno;
- Fabricação de esmeril;
- Indústria automobilística;
- Indústria aeroespacial;
- Circuitos eletrônicos;
- Lentes para equipamentos de radiação a laser;
- Suporte de disco na indústria de computador;
- Instrumentos cirúrgicos;
- Polimento de pedras;
- Corte de pedras;
- Gravura;
- Abrasivos.

Há dois tipos de diamante industrial natural: pedra de diamante, normalmente maior do que 60 malhas (250 μm), e diamante *bort* (menor, material fragmentado).

As pedras de diamante são usadas principalmente em brocas de perfuração e também incorporadas em ferramentas simples ou de múltiplos pontos, serras de diamante, esmeril etc.

Diamante *bort* é usada para brocas de perfuração, como grãos abrasivos para polimento. Outras ferramentas que usam o diamante *bort* cravejado em uma matriz são: cortadores de vidro, instrumentos cirúrgicos etc.

Os diamantes sintéticos do tipo *grit* (areia) e pó são usados em esmeril a diamante, serras, ferramentas e brocas impregnadas e como compostos abrasivos para polimento. Pó e compostos feitos de diamante sintético são usados, principalmente, para acabamento óptico de superfície, jóias, gemas, ferramentas de corte etc. Uma centena de outros produtos feitos a partir de metais, cerâmicas, plásticos e vidro usa o pó de diamante para fazer o seu acabamento.

O diamante possui várias qualidades e dentre essas se destacam: dureza, resistência à compressão, condução térmica etc. Outra propriedade importante do diamante é a sua resistência ao calor. É uma das razões porque as ferramentas submetidas a constantes variações térmicas têm que ser trocadas, no entanto os diamantes podem ser reaproveitados. A dureza é a principal propriedade do diamante, principalmente quando esse se destina ao uso industrial. O diamante resiste à abrasão, mas não ao choque.

Até hoje, o diamante é o mais duro dos materiais. Sua dureza, seu índice de refração e sua raridade natural fazem com que o diamante tenha um interesse gemológico ímpar.

A condutibilidade térmica do diamante aliada a um coeficiente de dilatação térmica muito pequeno confere ao diamante várias aplicações nos trabalhos relacionados com substâncias duras: corte, polimento, trefilação etc. (Simon, 1970).

Segundo Schwartz (1984), algumas propriedades do diamante lhe conferem uma aparência peculiar:

- i. alto índice de refração (2,417) produz a reflexão total de grande parte da luz incidente, conferindo brilho ao diamante;

- ii. A alta dispersão, ou seja, a separação da luz branca incidente nas cores do arco-íris, confere ao diamante a propriedade conhecida como ‘fogo’;
- iii. A dureza elevada lhe confere resistência mecânica, no entanto, o diamante é bastante sensível ao choque devido à sua clivagem perfeita;

O diamante reúne três características importantes que fazem deste uma excelente gema: resistência mecânica ao uso, raridade (para 1 quilate é necessário processar 20 t de rocha) e apenas uma pequena percentagem dos diamantes recuperados tem qualidade de gema. A combinação de tamanho, cor e forma tornam o diamante único; a beleza vem do seu brilho (alto índice de refração), luz, cintilação etc., que supera seus concorrentes. A seguir são apresentadas, na Tabela 2, as propriedades do diamante e de outras gemas.

Tabela 2: Propriedades do diamante e outras gemas.

GEMAS	PROPRIEDADES				
	Cores	Dureza (Mohs)	Densidade	Índ. de Refração (brilho)	Dispersão (luz)
Diamante Natural	Incolor, Amarelo, Marrom, Rosa, Verde, Cinza, Preto.	10	3,52	2,417*	0,044
Granada com Gadolínio e Gálio	Incolor	7	7,05	2,05*	0,038
Granada com Ítrio e Alumínio	Incolor	8+	4,65	1,8333*	0,028
Titanato de Estrôncio	Incolor	5-6	5,13	2,41*	0,19
Pasta (vidro de chumbo)	Incolor	5,5	3,74	1,63*	variável
Zirconita Cubica	Incolor	8,5	5,4-5,7	2,15*	0,060
Niobato de Lítio	Incolor	6	4,64	2,21-2,30**	0,13
Zircão	Incolor, Amarelo, Marrom, Vermelho, Púrpura, Azul, Verde.	7+	4,67	1,926-1,985**	0,139
Topázio	Incolor, Amarelo, Marrom, Vermelho, Azul, Verde.	8	3,56	1,612-1,622**	0,014
Quartzo	Incolor	7	2,65	1,544-1,553**	0,013

*refração simples; **refração dupla

Fonte: Harben (1995)

O diamante natural industrial é aquele que, devido às suas falhas em cor ou estrutura, ou devido ao seu tamanho ou forma, é inadequado para uso como gema. O diamante industrial é usado para diferentes finalidades, mas todas elas baseadas na sua propriedade de elevada dureza (10 na escala de Mohs), senão vejamos:

Broca de perfuração: o diamante cravejado na matriz da broca, tem a função de cortar a rocha, normalmente cristalina e de alta dureza, quando é feita a perfuração com retirada de testemunho da rocha.

Abrasivo: O diamante, devido a sua alta dureza, tem a função de promover o polimento de uma superfície.

5. ESPECIFICAÇÕES

Antes do diamante bruto ser comercializado, é imprescindível estabelecer o seu preço. Desta forma, a primeira etapa na sua avaliação é classificá-lo, por catação manual, nos diferentes tipos: em gemas, quase gemas e industriais, levando em consideração os denominados 4 C do inglês: *color* (cor), *carat* (peso em quilate), *clarity* (limpidez) e *cut* (lapidabilidade) (Barbosa, 1991; Die Met, 1999).

No caso de um diamante de qualidade, esse é classificado várias vezes: no local da própria mina onde foi produzido, normalmente nos escritórios de venda na Antuérpia-Bélgica, pelos negociantes de diamante, pelos lapidadores e pelos fabricantes de jóia.

Limpidez (clarity): Para indicar o grau de limpidez de um diamante, é necessário determinar o número e a natureza das inclusões na gema, bem como seu tamanho e posição. A limpidez reflete as imperfeições, as inclusões e defeitos do diamante. Pode ser considerado sem defeito, se o diamante não apresenta bolha, pontos de carbono, quebras ou manchas, usando, para tal, lupa binocular com amplificação de dez vezes. Qualquer inclusão no diamante, por menor que seja, reduz drasticamente o valor da gema. Esse trabalho de avaliação do diamante é normalmente realizado por um gemólogo. Quanto à limpidez, os diamantes são classificados em:

- FL: sem defeito (*flawless*), livre de manchas internas visíveis sob magnificação de 10 vezes; pequenos detalhes externos, são tolerados;
- VVS: ínfimas inclusões (*very, very slightly included*), quando as inclusões ou manchas são muito difíceis de localizar, sob magnificação de 10 vezes;
- VS: pequeninas inclusões (*very, slightly included*), quando as inclusões e manchas externas são difíceis de localizar, sob magnificação de 10 vezes;
- SI: pequenas inclusões (*slightly included*), quando as inclusões e manchas externas são fáceis de localizar, sob magnificação de 10 vezes;
- P: Piqué (*imperfect*), quando as inclusões e manchas são muito fáceis de localizar, sob magnificação de 10 vezes.

Cor (color): A maioria das gemas de diamante varia de incolor a amarelo. A determinação correta da cor é feita comparando com um estojo (*kit*) de pedras (diamantes) aceito internacionalmente, que varia de D ou incolor - o mais procurado pelas pessoas – a Z (o mais amarelo). Ocorrem outras cores no diamante: laranja, cor de rosa, azul etc.

Peso (carat): O peso ou o tamanho do diamante é medido em quilates. Um quilate é 0,2 g ou 200 mg e corresponde a 100 pontos.

Lapidabilidade (cut): A forma como o diamante é lapidado e polido é fator determinante na vida, brilho e lustre do diamante. O brilhante, lapidação arredondada, é o mais procurado; no entanto existem outras formas extremamente belas de lapidação, denominadas de marquise, pêra, oval, esmeralda, formato de coração, todas essas altamente valorizadas, do ponto de vista econômico.

6. MINERAIS E MATERIAIS ALTERNATIVOS

Não existe material substituto para a maioria das aplicações do diamante. Não existe nenhum substituto para perfuração, com testemunho de sondagem, de rochas duras ou concreto. Alguns processos de moagem, corte e acabamento usando equipamentos eletrolítico e ultra-sônico competem, de alguma forma, com o diamante, no entanto, têm uso limitado devido ao seu maior custo, pouca adaptabilidade, dentre outros fatores. O nitrato de boro cúbico é um abrasivo, já em produção, e que pode se tornar importante no futuro, em particular para aplicações ferrosas. Esse material tem dureza de 4700 na escala de dureza *knoop*, em comparação com o diamante que está no topo da escala, com dureza *knoop* 7000. Outros produtos competitivos são o carbetto de silício, óxido de alumínio fundido e carbetto de tungstênio, com dureza *knoop* de 2480, 2100 e 1900, respectivamente (Smoak, 1985).

AGRADECIMENTOS

Quero consignar meus agradecimentos ao CETEM, na pessoa do Sr. Diretor, Dr. Adão Benvindo da Luz, pelo honroso convite para colaborar, ainda que modestamente, na elaboração deste trabalho. – Mário Jorge Costa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNUAL REPORT (1998-1999). Die Met Minerals Ltd.

BARBOSA, O. (1991). Diamante no Brasil – Histórico, Ocorrência, Prospecção e Lavra, CPRM, Rio de Janeiro, 136p.

CASSEDANNE, J.P. (1989). Diamonds in Brazil, The Mineralogical Record, volume 20, September-October.

CLEMENT, C.R.; SKINNER, E.M.W. e SCOTT-SMITH, B.H. (1984). Kimberlites re-defined. Journal of Geology. V. 92, p. 223-228.

CLIFFORD, T.N. (1966) Tectono-metallogenic units and metallogenic provinces of Africa. Earth and Planetary Science Letters, v.1, p. 421-434

DAVIS, J. (2003). The diamond wars have begun. In; WIRED, September.

- FIPKE, C.E., GURNEY, J.J. e MOORE, R.O. (1995). Diamond exploration techniques emphasising indicator mineral geochemistry and Canadian examples. Geological Survey of Canada – Bulletin 423. Ottawa.
- GURNEY, J.J.(1984). A correlation between garnets and diamonds in Kimberlites. In: Kimberlite Occurrence and Origen. Geology Department and University Extension, University of Western Australia, Publication No. 8, p 143-166
- HART, M (2001). Diamond – A journey to the heart of an obsession. Pinguin Books Canada Ltd, Toronto.
- HARBEN, P. W. (1995). Diamond. In: The Industrial Minerals HandyBook, 2nd Edition, p.53-56.
- JANSE, (BRAM) A.J.A. (1995). A history of diamond sources. In: Africa: Part I, Gems & Gemology, Vol. 31, No. 4, p. 228-255.
- JANSE, (BRAM) A.J.A. (1996). A history of diamond sources. In: Africa: Part II, Gems & Gemology, Vol. 32, No. 1, p. 2-30.
- K. RECKLING, R. B.; HOY, S. J. L.; DEREK, G. F. e ROWEL, U. H. (1994). Diamond, Industrial. In: Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition, Donald D. Car, Senior Editor, p.379-395.
- KJARSGAARD, B.A. (1966). Kimberlites. In: Searching for diamonds. In: Canada, Geological Survey of Canada – Open File 3228, p.29-37. Ottawa.
- MITCHELL, R.H. (1986). Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology. Plenum Press. New York. 442 p.
- MITCHELL, R.H. (1995). Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks. Plenum Press. New York. 410 p.
- MUGGERIDGE, M.T. (1995). Pathfinder sampling techniques for locating primary sources of diamond: recovery of indicator minerals, diamonds and geochemical signatures. Journal of Geochemical Exploration, v. 53, p. 183-204.
- OLIVEIRA, M. A. (2003). Diamante. Sumário Mineral, DNPM, p.60-61.

OLSON, D. W. (2002). Industrial diamond. In: Mineral Industry Survey –USGS, 2001, Annual Review, p.23.1-23.9.

SCHWARTZ, D.(1984). As limitações do diamante: suas propriedades e a sua identificação. Revista Escola de Minas, Vol. 32, nº01, p.29-41, Primeiro trimestre.

SMOAK, F. J.(1985). Diamond-Industrial. A Chapter from Mineral Facts and Problems, Edition, 16 p.

SIMON, B.(1970). A síntese do diamante. Gemologia nº37, p.33-44.

UENF (2004). UENF produz 10 mil quilates de diamante, www.uenf.br
www.gemesis.com
www.apollodiamond.com.