PETROLOGIA DE PEGMATITOS E SUA RELAÇÃO COM AS PEDRAS
PRECIOSAS

ALTAMIR B. DE OLIVEIRA

DEDALUS - Acervo - IGC

30900006384

PETROLOGIA DE PEGMATITOS E SUA RELAÇÃO COM AS PEDRAS PRECIOSAS

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma descrição petrográfica e petrológica de uma das mais importantes rochas sob o ponto de vista econômico, os pegmatitos.

Após as principais considerações sobre sua petrologia, são comentadas as experiências feitas no laboratório da Cadeira de Petrologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo com alguns dos mais importantes minerais gemológicos de origem pegmatítica, especialmente berilos e topázios.

Com tratamentos térmicos consecutivos conseguiu-se, fato inédito na literatura científica, a transformação das variedades verdes e azuis de berilo para a cor rosa.

Indubitavelmente, dentro do campo petrológico, os mais importantes tipos de rochas para a Gemologia são os pegmatitos. Bastaria para provar este fato, lembrar por exemplo que a grande maioria das pedras preciosas e semi-preciosas brasileiras têm sua origem ligada a esta rocha. A conceituação genética dos pegmatitos é complexa, os petrólogos e geólogos dividindo-se em vários grupos quando a tentam explicar. São sempre rochas que exibem uma granulação grossa e geralmente arranjo irregular nos minerais presentes. Usualmente a composição mineralógica se resume em: quartzo, feldspato (microclínio ou ortoclásio), plagioclásio (geralmente sódico) e micas. Mas é comum encontrar-se em grande número de pegmatitos, além dos minerais já citados, outros, como berilos, turmalinas, crisoberilos, espodumênio, molibdenita, brasilianita, minerais de urânio, ítrio, estanho, tungstênio, nióbio, titânio, escândio, columbita, tantalita e muitos outros, de grande interesse econômico.

Por isto, para efeito de uma primeira classificação podem ser divididos em apenas dois grupos:

Os simples, constituídos de quartzo, feldspato alcalino e micas e os complexos, aqueles que além dos minerais presentes nos primeiros possuem em grande quantidade, minerais raros como beri-

los, columbita, tantalita, topázio, turmalina, torita, uraninita, apatita, zircão, espodumênio, ambligonita, crisoberilo, lepidolita, brasilianita e outros.

Tanto os simples quanto os complexos constituem sempre massas limitadas, podendo variar de alguns centímetros a centenas de metros de espessura. Normalmente ocorrem associados à massas graníticas e preferencialmente ao que tudo indica, em suas margens. Já os simples aparecem frequentemente nas margens ou no interior de massas graníticas. Mas a conceituação teórica sobre a origem dos pegmatitos é bastante complexa. São inúmeros os petrólogos que interpretam-nos como produtos de injeção magmática em fendas de rochas pré-existentes. Se nos restringirmos a um laboratório químico comum e tomarmos três minerais, por exemplo, ortoclásio, albita e quartzo e os fundirmos e depois deixá-los esfriar, o produto que vamos obter será um vidro homogêneo, sem qualquer indício de cristais. Mas se procedermos de maneira idêntica e adicionarmos aos três minerais que deverão ser fundidos vapor de água, iremos verificar em primeiro lugar que a consolidação do material fundido vai se realizar em temperatura mais baixa e, principalmente, que iremos constatar o aparecimento de cristais dos minerais fundidos. Por isso diz-se que o vapor d'água é um agente mineralizador ou mineralizante. Se fizermos a mesma experiência com outros elementos voláteis como cloro, fluor, etc. iremos sempre verificar uma cristalização dos elementos mineralógicos fundidos.

O interior da terra não é nada mais que um grande, enorme laboratório sujeito às mais variadas situações e condições. É óbvio para os magmatistas que em uma câmara magmática, ao cabo da cristalização de uma rocha plutônica, tipo granito deve sobrar, um líquido residual muito mais rico em elementos voláteis. Este magma residual evidentemente, também poderá se consolidar dando certamente um tipo de rocha de textura muito grossa. As condições de formação, com grande quantidade de "agentes mineralizantes" favorecem o crescimento de cristais com dimensões fora do comum. Apenas para exemplo poder-se-ia citar um cristal de espodumênio, encontrado na Noruega que pesou cerca de 200 toneladas. A ocorrência comum em pegmatitos, de minerais contendo fósforo, enxofre, cloro, boro, fluor sugere realmente que estas injeções magmáticas sejam acompanhadas de substâncias voláteis que sem dúvida tiveram um papel preponderante em sua formação. Provavelmente tais substâncias torna-

ram o magma mais fluido e assim permitiram o crescimento às vênas até mesmo gigantesco dos minerais.

Devido ao fato dos pegmatitos apresentarem grande variedade de minerais admite-se que não se originaram de um só magma mas de uma série de processos de substituição, quando então as soluções aquosas e os agentes voláteis foram paulatinamente introduzindo novos minerais aos já formados.

Todavia, nos últimos anos, a origem magmática dos pegmatitos vem, sendo continuamente arguida.

A hipótese magmática se ancorava no estudo de pegmatitos, economicamente importantes e de zonação bem desenvolvida. Um exemplo esquemático é fornecido abaixo:

Figura 1

- I - Quartzo, turmalina, microclínio, berilo, columbita.
- III - II - Albita, muscovita, lepidolita, quartzo.

Cada espécie mineral ou associação é encontrada, somente ou preferencialmente em uma das zonas. Assim a cassiterita é vista na zona II, berilo e columbita na zona I, grandes cristais de muscovita na borda da zona I, etc.

Com a existência de apenas alguns afloramentos, era fácil explicar esse zoneamento, como devido a injeções magmáticas repetidas, carregadas de voláteis (pneumatolíticas), com composição variável, através de uma fissura abrindo-se lentamente. As mudanças de

composição foram supostas como sendo devidas à trocas na câmara magmática, e à perda de constituintes voláteis durante o resfriamento.

Mas nos últimos 20 anos, várias prospeções minerais, acompanharam filões pegmatíticos encaixados em xistos e verificou-se que eles não terminam num corpo granítico, mas no próprio xisto. São envolvidos por xisto por todos os lados, e as zonas também se ancoraram, não havendo abertura pela qual pudesse ter havido uma injeção.

Parece não haver outra alternativa a assumir, senão a de que nestes casos, o pegmatito formou-se por difusão através das encaixantes. Provavelmente a difusão seguiu para uma fissura aberta ou outra zona de baixa pressão.

É duvidoso que, mesmo num dique pegmatítico, o material tenha jamais atingido estado fundido. Poderia talvez cristalizar-se átomo por átomo, a medida que chegavam, sem atingir um estado fluído. Esta suspeita é ajudada pelo fato de que às vezes o pegmatito forma "boudins" no xisto:

Como "boudinage" somente ocorre num material rígido, envolvido por um mais plástico, presume-se que o xisto foi, pelo menos no último estágio da deformação mais móvel que o pegmatito.

No entanto, se os pegmatitos não são considerados como destilação final de um granito em cristalização, de onde vieram as terras raras, o tungstênio, o boro, o lítio, etc? É possível serem eles componentes primitivos dos sedimentos, disseminados em baixa concentração, e que mobilizando-se durante o metamorfismo, migraram com os álcalis e a sílica para áreas de menor pressão (3ª lei da termodinâmica), onde se formam os pegmatitos. Mas isto é ainda incerto, mais incerto ainda do que muitos geólogos poderiam supor há 20 anos.

Mas o fato é que poderá haver dúvida se um dique pegmatítico particular é uma fissura dilatada que foi preenchida pelo material pegmatítico ou o resultado de uma transformação metassomática agindo para fora, a partir de uma junta.

1 - fissura dilatada

2 - metassomatismo em juntas

As setas indicam o sentido da migração

Para distinguir-se entre esses dois casos é importante a relação estrutural dos diques com outros diques, com o acanamento ou com a xistosidade. Por exemplo poderíamos citar os seguintes fatores:

1) Em dilatação de fissura, há um deslocamento das estruturas que não lhe forem perpendiculares.

Em metassomatismo não há deslocamento das estruturas da encaixante, que continuam não perturbadas de um lado e outro do dique. Este fato serve para demonstrar que os contactos retos e nítidos não indicam obrigatoriamente uma intrusão.

2) Evidências também são dadas pela espessura do dique.

Nos casos com espessuras variando, trata-se de diques formados em fissuras dilatadas. Perpendicularmente à direção de abertura (afastamento) as espessuras são menores.

Nos casos com uma espessura constante, trata-se de dique provocado por metassomatismo a partir de planos de juntas.

Em contactos irregulares essa propriedade é difficilmente aplicada.

Deve-se ter cuidado em escolher secções normais ao contacto, pois nas secções inclinadas, mesmo as pequenas irregularidades produzem grande efeito.

3) A orientação e a forma das inclusões pode ser um indício, mas também causa de enganos.

Se tivermos orientação das inclusões na mesma posição da encaixante, não podemos distinguir se houve preenchimento de fissura dilatada ou metassomatismo, pois ambos podem dar essa forma.

Se as inclusões estiverem em discordância com as encaixantes, provavelmente trata-se de um dique produzido em uma fissura dilatada.

Uma provável transformação metassomática é exemplificada na figura abaixo, com as inclusões orientadas concordantemente com a encaixante, mas em posição difficilmente explicada por fissuras:

Evidência de mobilização ao longo de planos de fissuras é a ocorrência de inclusões de natureza diversa da encaixante, provando sua ascensão.

Essa mobilidade e fluidez do pegmatito também é sugerida onde pegmatitos cortam rochas calcáreas ou quartzíticas, das quais uma migração iônica de alumina, álcalis etc. parece impossível.

No sudoeste africano existem muitas ocorrências de pegmatitos cortando camadas de marga. Há quase certeza de que o material foi injetado líquido, pois a marga seria capaz de dar calcossilicatos e não feldspatos. Contudo o material não seria originário de um magma granítico profundo, mas de camadas xistosas inferiores à marga.

Evidência da ascensão do material é a ocorrência de turmalina nas paredes da encaixante, tendo migrado do dique para a encaixante. O crescimento de cristais nas paredes internas do dique pode indicar que o material foi fluido.

Assim é observado um alargamento de cristais até se interferirem, principalmente em turmalina.

Este crescimento pode ser facilmente explicado como cristais crescendo em um líquido.

Como esse fenômeno por vâzes se repete em diferentes zonas, parece provável que os pegmatitos zonados tenham tido um núcleo líquido para o qual convergiram as zonas em cristalização. O zoneamento comumente mostra evidências da queda de temperatura da parede para o núcleo, que geralmente exhibe agregação de quartzo. É facilmente explicada como cristalização de um líquido em cavidade com temperatura decrescente. Cristalização da sólido por migração iônica é difícil de aplicar-se neste caso,

Se o núcleo de quartzo cristalizou-se primeiro, sob temperatura em declínio, o que é incomum, cristais de quartzo poderiam crescer do núcleo para fora, o que não é visto. Ou os íons migrando para o núcleo poderão ter atravessado a barreira das zonas onde poderiam provocar mudanças nos minerais com a queda da temperatura. Isto também nunca foi observado.

Só raramente os pegmatitos mostram evidências de fluidez do material, como lineação, cristais dobrados ou quebrados. Isto não é de se admirar, se assumirmos que pegmatitos são corpos fechados, sem grande movimento interno, sem levar em consideração se o material era fundido ou não. Mas em relação à mineralização da cassiterita, há boas evidências de que os componentes do mineral, provavelmente sob a forma de gases, fizeram um movimento ascensional no dique.

As maiores concentrações de cassiterita são encontradas em bolsas e cúpulas, formadas no tópo de diques inclinados.

São gases ou soluções ascendentes que ficaram barradas pelo teto. Concentrações similares também ocorrem com o lítio (lepidolita etc.), mas parece não ocorrer para outros minerais de importância econômica.

A análise crítica desses dados leva-nos à conclusão de que alguns pegmatitos são o resultado de transformações metassomáticas, outros são produto da injeção de material móvel, gerado por transformações metassomáticas, para dentro de fendas, e outros ainda resultam da acumulação líquida produzida por migração iônica através das rochas vizinhas.

Olhando todas as características diferentes, sem preconceitos, pode-se concluir que todas as possibilidades podem ocorrer em uma ou outra área.

Pegmatitos ocorrem em diques "discordantes" ou concordantes. Comumente ambos são encontrados na mesma área mas em regra, um tipo é mais frequente do que o outro.

A predominância de diques concordantes ou discordantes não depende só das condições de stress, mas também da rocha. Assim em micaxisto, filito ou gnaiss são mais comuns os diques concordantes, ao passo que em rochas mais duras e quebradiças como anfibolitos, diques discordantes tendem a ser mais numerosos.

Essas regras não são absolutas, podendo ocorrer diques discordantes em xistos ou gnaisses.

Geralmente, os maiores pegmatitos são da mesozona. Na catazona ocorrem somente pequenos veios e apenas raramente aparecem na epizona.

Comumente diferem de região para região. Alguns possuem como minerais raros principais a cassiterita, columbita, tantalita e em outros estes faltam e aparecem a brasilianita, lepidolita e turmalina.

Um pegmatito na Virginia, U.S.A., na localidade de Nelson Country apresenta uma combinação sui-generis de cristais: zircônio, ilmenita e apatita.

Na África do Sul, ocorrem inúmeros pegmatitos com cassiterita na região de Zaaipplaats, no Transvaal.

Nos Estados Unidos da América ocorrem, como em Dakota do Sul alguns dos mais famosos pegmatitos do mundo. Caracte-

rizam-se por possuírem cristais de espodumênio atingindo até 13 metros de comprimento. São os maiores até hoje encontrados. No Brasil ocorrem praticamente todos os tipos de pegmatitos. A diferença entre eles está não só na sua morfologia mas ainda na rocha que os contém. Variam também suas dimensões e constituição mineralógica.

No Estado de São Paulo, na região de Perus ocorrem pegmatitos encaixados em granitos e micaxistos. Apresentam-se em diques e lentes, geralmente com alguns metros de espessura. Sua mineralogia se resume em quartzo, feldspato potássico e feldspato sódico (albita de coloração azulada) e ainda lepidolita, granada, mica branca, apatita, turmalinas pretas, róseas, roxas, vermelhas e amarelas.

Alguns pegmatitos de Perus exibem massas constituídas de feldspato e quartzo intercrescidos regularmente, recebendo a designação típica de pegmatito gráfico ou hebraico. O feldspato nessa região está quase sempre totalmente alterado em caulim. Gemologicamente até o presente momento esta região não se mostrou interessante pois as turmalinas encontradas estão, com raríssimas exceções, intensamente fraturadas ou alteradas não se prestando, absolutamente para fins de joalheria.

No município de Mogi das Cruzes, também no Estado de São Paulo a mineralogia é típica: amblygonita, cassiterita, tantalita, berilo e turmalina, além de quartzo, feldspato e micas. Visitamos esta ocorrência e ali nada de interesse gemológico foi encontrado. As turmalinas pretas e os berilos apresentam-se, como os de Perus intensamente fraturados.

Mas a natureza, que conseguiu concentrar tantos minerais úteis em rochas de dimensões limitadas, como são os pegmatitos, distribuiu-as profusamente em território brasileiro. Nossos pegmatitos constituem fonte comercial de ítrio, zircônio, nióbio, tântalo, tório, urânio, lítio, berílio, cério e fluor. Sem dúvida alguma estas rochas são a fonte de numerosos produtos do mais alto interesse para a indústria mineral.

E sob o ponto de vista da Gemologia assumem caráter de importância capital pois muitas são as pedras preciosas que têm origem ligada a pegmatitos.

Compreende-se a importância desta concentração em nosso país. Inúmeras e importantíssimas são as ocorrências de pegmatitos portadores de pedras preciosas encontradas por exemplo no estado de Minas Gerais. Somente nas ilhas do Ceilão e Madagascar pode-se

encontrar tão ampla variedade de gemas como nesse estado brasileiro. De todas as pedras preciosas aqui encontradas o berilo constitui a maior porção industrializada. Praticamente a totalidade da produção vem da parte norte e nordeste. As cinco principais cores - verde, amarelo (heliodoro), rosa (morganita), azul (água-marinha); e incolores (goshenita) estão amplamente representadas.

A goshenita, incolor, não tem muito valor comercial. O berilo verde ocorre em diversos matizes e a cor verde-grama, da variedade esmeralda, apenas nos últimos anos tem sido encontrada.

Recentemente o autor deste trabalho visitou praticamente todas as regiões conhecidas de garimpagem de esmeraldas dos Estados de Minas Gerais e Bahia. Pedras de rara beleza e coloração excelente, estão sendo retiradas nas várias ocorrências.

Quanto ao berilo azul, a água-marinha, também há muitos anos estão sendo produzidas pedras de raríssima beleza e de considerável valor econômico. Visitamos várias regiões de produção de água-marinha, na Bahia e Minas Gerais principalmente. Este último estado brasileiro é mundialmente considerado como o maior produtor de água-marinha. Alguns dos mais notáveis espécimens do mundo foram descobertos nas minas da parte norte e nordeste do Estado. Em uma fazenda de Teófilo Otoni, encontrou-se há poucos anos um exemplar que pesou cerca de 33,938 kg. Este mineral foi bastante estudado e divulgado, tornando-se um critério para a avaliação da cor dos berilos azuis. Perto de setenta por cento de seu volume revelou ser de boa qualidade para lapidação e a maior área possuía uma das mais apreciadas tonalidades de azul já mais visto.

Ainda hoje, perto de Teófilo Otoni, na mina de Santa Maria a produção de excelentes exemplares é uma constante.

Foram coletados pelo autor, três exemplares para estudo de coloração por tratamento térmico também na região vizinha à cidade mineira de Pedra Azul. Nos arredores de Encruzilhada e Nova Conquista, na Bahia foram da mesma maneira recolhidos exemplares.

O primeiro passo no laboratório da Cadeira de Petrologia foi tentar fazer, com técnica mais apurada, o que é há muitos anos feito empiricamente na quase totalidade dos casos em que se trabalha com uma variedade verde azulada ou verde amarelada de berilo.

Sabia-se a priori, que muitas água-marinhas do Brasil são produzidas tratando-se pelo calor uma determinada variedade verde de berilo. Expressiva quantidade de pedras verdes nunca atinge

T3081

o mercado exatamente devido à tentação de se obter o mais alto preço que a melhor qualidade azul atinge, algumas vezes o dobro ou o triplo.

Verificou-se que todas as amostras, mesmo as que continuam fendas, puderam ser aquecidas com êxito, sem ocorrer fraturas. Durante as experiências de laboratório apenas duas fraturaram-se devido à alta temperatura empregada. Isto foi possível concluir-se porque verificou-se que cada região apresenta determinada temperatura ideal de tratamento.

Para algumas pedras 350°C já é suficiente para a transformação mas em outras é necessária uma temperatura maior e um mais lento aquecimento e resfriamento do material.

Todos esses dados já eram bastante conhecidos. O que fizemos, devido a uma literatura incipiente ou praticamente nula, foi procurar as condições de aquecimento ideais, de transformação da variedade verde para azul. Mas resolvemos continuar o tratamento, para ver o que aconteceria e com surpresa verificamos:

1 - que todos os exemplares verdes-azulados ou verdes amarelados adquiriram em temperaturas variáveis, dependendo da região coletada, uma coloração azul.

2 - três exemplares aquecidos em cadinhos especiais, com óxido de magnésio em pó, e temperatura aumentada lentamente, de 100 em 100°C e com intervalos de 30 minutos em cada degrau de temperatura tornaram-se rosa quando atingimos 950°C .

Este fato, não registrado na literatura, é surpreendente e talvez seja a chave para futuras explicações sobre a côr das variedades de berilo.

Talvez não seja a presença de elementos cromatíferos os responsáveis pela coloração dos berilos mas sim a temperatura na época da formação desses minerais no pegmatito que lhes deu origem. Um cristal de berilo verde atinge primeiramente a côr azul e em seguida à temperaturas mais elevadas passa a exibir côr rosa acentuada.

Sabe-se que a variedade de berilo rosa natural, a morganita, frequentemente apresenta um tom amarelado de menor interesse econômico para a joalheria. Também são tratadas termicamente; provavelmente uma enorme porcentagem é tratada pelo calor para produzir uma côr mais atrativa e valiosa. Diríamos mesmo que quem tem conhecimento do assunto, conservaria apenas uma pequena porcentagem de pedras naturais rosa amareladas por curiosidade para coleção. Apesar da inclusão de minúsculas agulhas de rutilo em grande parte

das morganitas brasileiras, algumas são encontradas sem a menor imperfeição interna ou inclusão.

Outro mineral, frequentemente usado em joalheria e que tem sua origem nos pegmatitos é o topázio. É conhecido em várias cores e tonalidades sendo as mais comuns: incolor, amarelado, rosa e azul.

As variedades amarela e rosa são encontradas em Minas Gerais mas somente na região de Ouro Preto e em alguns municípios vizinhos. A descoberta de pedras perfeitas é rara e excepcionalmente encontra-se uma com mais de 6 ou 10 quilates. Sabíamos que a maior parte do material rosa tem essa cor adquirida por tratamento térmico. Verificamos que aquecendo-se em casinhos de porcelana comuns e usando-se qualquer material refratário para aquecimento e resfriamento lento, à temperatura de 450°C havia em todos os casos examinados a passagem da cor amarela para a rosa.

Como vimos, são muitas as pedras preciosas que têm sua origem ligada a pegmatitos. É fato curioso, apesar de serem rochas de alto interesse econômico, apenas algumas vezes são trabalhadas por causa das gemas que contêm. Elas são comumente exploradas porque podem produzir caulim, mica ou quartzo, por exemplo. Como curiosidade histórica pode ser citado o fato de que Minas Gerais apesar de ter sido sempre um grande produtor de gemas, teve sua maior produção exatamente durante a segunda guerra mundial. Importantes minerais de interesse bélico como berilo industrial, placas de mica, columbita, tantalita, cassiterita entre outros, exaustivamente procurados pelos aliados, eram encontrados em nossos pegmatitos em associações com pedras preciosas. Foi por esta razão que inúmeras foram as descobertas de pegmatitos ricos de gemas nesta época. Deste período a curto espaço de tempo após o conflito mundial a produção de pedras preciosas foi realmente muito grande. Para se ter uma idéia da extensão e profundidade dessa verdadeira "corrida" no comércio das gemas no país, dados estatísticos nos revelam que surgiram nos dois principais centros comerciais de pedras preciosas naquela época, Teófilo Otoni e Belo Horizonte, mais de 150 e 250 lapidadores respectivamente. Após alguns anos a indústria das gemas voltou ao normal.

Na realidade então a importância da profusão de pegmatitos existentes no Brasil e seu aproveitamento para a Gemologia é relativo. Não se tem mostrado econômico derrubar, triturar e selecionar toneladas e toneladas de rochas para delas se retirar como acon-

teceria na maior parte dos casos, apenas alguns quilates. De uma maneira geral, ainda se trabalha nos aluviões, em depósitos secundários, aonde a natureza já fez o trabalho de seleção do material de interesse gemológico. Mas indubitavelmente podemos afirmar que todos eles em sua quase totalidade tiveram sua origem primária nesse importante tipo de rocha, os pegmatitos.

BIBLIOGRAFIA

- M. Billings - Structural Geology
- L. U. De Litter - Structural Geology
- A. Betekhtin - A Course of Mineralogy
- F. J. Turner - Igneous and Metamorphic Petrology
- E. Artini - I Minerali
- E. Artini - Le Rocce: Concetti e nozioni di Petrografia
- E. S. Dana - The System of Mineralogy: Descriptive Mineralogy
- E. S. Dana - A Text-book of Mineralogy: with an extended treatise on crystallography and physical mineralogy
- U. G. Cordani, C. B. Gomes e V. A. V. Girardi - Rochas cálcio-silicatadas da região de Perus, SP - Anais da Acad. Bras. de Ciências, v. 35, n. 3, 1963
- F. M. Bastos e C. Slawson - As pedras preciosas de Minas Gerais - Gemologia, n. 14, p. 21
- J. E. S. Campos - Sobre um cristal de berilo do Estado do Espírito Santo - Gemologia n. 5, p. 1
- R. R. Franco - Sobre os pegmatitos - Gemologia n. 3, p. 21
- V. Leinz e O. H. Leonardos - Notas sobre as esmeraldas da Fazenda das Lages, Itaberaí, Goiás - Gemologia n. 16, p. 7
- E. Reis - Aspectos da gemologia no Brasil - Gemologia n. 20, p. 1
- E. Reis - Sobre um berilo de Teófilo Otoni - Gemologia n. 29, p. 11
- W. S. Curvello - O maior cristal de kunzita do mundo - Gemologia n. 31, p. 51
- R. R. Franco - As gemas e os metais responsáveis pelas suas cores - Gemologia n. 32, p. 27