

Cristiane Castañeda • João Eduardo Addad • Antonio Liccardo

Gemas de Minas Gerais

Esmeralda, Turmalina, Safira, Topázio, Quartzo, Água-marinha, Alexandrita



ISBN 8588618-01-X



9 788588 618015

e s m e r a l d a s a f i r m a q u a r t z o a l e x a n d r i t a
t u r m a l i n a t o p a z i o á g u a - m a r i n h a

Cristiane Castañeda
João Eduardo Addad
Antonio Liccardo

Organizadores

Gemas de **Minas Gerais**

Esmeralda, Turmalina, Safira, Topázio,
Quartzo, Água-marinha, Alexandrita

Belo Horizonte
Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Minas Gerais
2001

Reservados todos os direitos.

Nenhuma parte deste livro pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de informática ou transmitida de qualquer forma ou por meio eletrônico, mecânico, fotocópia, gravação ou outros métodos sem permissão prévia do proprietário da *copyright*.

Organizadores:

Cristiane Castañeda, João Eduardo Addad, Antonio Liccardo

Preparação e Revisão de Texto

Luiz Antônio Prazeres

Revisores Técnicos

Beatriz Hutzler Artel, Cristiane Castañeda, Dirceu M. Vizeu, Ester Figueiredo de Oliveira, Fernando Roberto Mendes Pires, Leonardo Lagoeiro, Márcia Moura Abraão, Marco Antônio Fonseca, Maria Sílvia Dantas, Nilson Francisquini Botelho, Norma Moller de Freitas, Sara Lais Rahal Lenharo

Projeto Gráfico

Laboratório de Design - Escola de Design/Universidade do Estado de Minas Gerais

Equipe

Patrícia Caetano, Fabrício Castello Branco Coelho, Rafael Neder Barroca

Coordenador do Laboratório de Design

Silvestre Rondon Curvo

Coordenadora do Projeto

Mariana Misk

Fotos da Capa

Antonio Liccardo

SBG-MG

Presidente: Cristiane Castañeda

Vice-Presidente: Nilza Tôres de Andrade Saraiva

1º Secretária: Adriana Borrelli Achtschin

2º Secretária: Leandro Barros Reis

1º Tesoureiro: Osvaldo Castanheira

2º Tesoureiro: Adolf Heinrich Horn

Diretor de publicações: Fernando Guimarães

Conselheira: Luciana Felício Pereira

Conselheiro-Suplente: João Luiz N. de Carvalho

1º Suplente de diretoria: José Maria Leal

2º Suplente de diretoria: André Klumb

Castañeda, Cristiane; Addad, João E.; Liccardo, Antonio

Gemas de Minas Gerais / Castañeda, Cristiane, Belo Horizonte: SBG - MG, 2001.

288 páginas

ISBN 85-88618-01-X

1. Gemas. 2. Geologia Econômica

COD 553.8

CDU 553.8

1ª Edição

A Edição original desta obra foi publicada em português pela
Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Minas Gerais (SBG-MG),
Belo Horizonte, Minas Gerais, com o título
Gemas de Minas Gerais

Editora

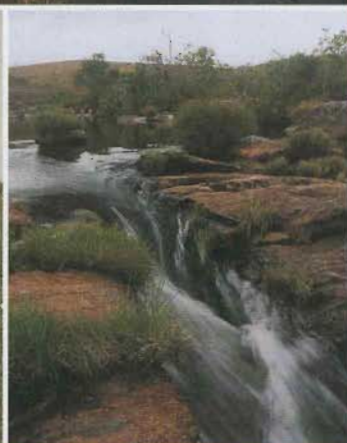
Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleo Minas Gerais
Rua Aimorés, 562/ sala 105 - Funcionários - Belo Horizonte/MG - CEP 30.140-070

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

Gemas de Minas Gerais

Esmeralda, Turmalina, Safira, Topázio,
Quartzo, Água-marinha, Alexandrita.





• O Unicentro Newton Paiva atua na área de geociências desde 1991, quando foi criado o Curso de Geografia. Posteriormente, em 1999, este curso foi reformulado, passando a denominar-se Geografia e Meio Ambiente. De conteúdo contemporâneo e inovador, adequado ao mercado de trabalho, o curso possui disciplinas que abordam as questões ambientais no contexto da Geografia, oferecendo ao aluno uma visão sistêmica e reflexiva do meio em que vive. Nessa abordagem transdisciplinar, insere-se a geologia, e, conseqüentemente, a gemologia. Consideramos a obra "Gemas de Minas Gerais" um excelente material de estudo e trabalho para as geociências, bem como para todos aqueles que se interessam por este assunto tão fascinante: as "pedras preciosas" de nossas Minas Gerais.

Poder apoiar uma publicação como esta é, mais que uma ação gratificante, uma enorme oportunidade de servir. Esta é uma obra inédita, de cunho científico altamente relevante, fruto de vários anos de pesquisa de profissionais conceituados e que, certamente, será referência obrigatória para consulta. Vem preencher uma lacuna existente na literatura especializada, já que as publicações disponíveis não contemplam de maneira tão detalhada e objetiva o potencial mineral de nosso Estado.

Curso de Geografia e Meio Ambiente
Centro Universitário Newton Paiva

A p r e s e n t a ç ã o

Pedras preciosas são muitas, são raras, de todas as cores, de todas as formas, de todos os tipos, de todos os gostos. Há de achá-las. Haja esforço!

A criação de entidades privadas de apoio ao setor de gemas e metais preciosos, tais como a Associação dos Joalheiros, Empresários de Pedras Preciosas, Relógios e Bijuterias de Minas Gerais/AJOMIG, em 1964, em Belo Horizonte, o Sindicato das Indústrias de Joalheria, Ourivesaria, Lapidação de Pedras Preciosas e Relojoarias no Estado de Minas Gerais/SINDIJOIAS-GEMAS/MG, em 1989, em BH, o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos/IBGM, em 1977, em Brasília, a Associação dos Comerciantes e Exportadores de Jóias e Gemas do Brasil/GEA, no ano de 1989, em Teófilo Otoni, e outras entidades nos Estados brasileiros, permitiram maior organização desse setor e a integração com o sistema público, representado por entidades tais como a METAMIG, hoje COMIG, de 1961, a Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/CPRM, o Departamento Nacional da Produção Mineral/DNPM, de 1934 e o Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais/BDMG.

Em Minas Gerais, foram implementados vários projetos, tais como o Pegmatitos, 1974, Projeto Leste, 1996, as Missões Tecnológicas, 1997, o Projeto Espinhaço, 1998, além de outros, que promoveram avanços significativos na organização do setor, no entendimento da origem e no aumento da extração de pedras preciosas.

Mais recentemente, sob a coordenação do IBGM, com suporte da Agência de Promoção de Exportações/APEX e do SEBRAE, vem sendo implementado o Programa Setorial Integrado de Apoio às Exportações de Gemas e Metais preciosos/PSI, que está promovendo uma maior capacitação das empresas do setor para atuação no mercado externo, com o conseqüente aumento das exportações brasileiras.

A força de Minas Gerais no Setor de Gemas e Metais Preciosos

Minas Gerais é o maior produtor de pedras preciosas e ouro do país, sendo responsável, hoje, por, aproximadamente, 45% das exportações brasileiras no setor de gemas e metais preciosos. Esse estado conta com 100 empresas de extração de metais preciosos, cerca de 100 empresas de extração de pedras preciosas, mais de 300 empresas de lapidação, cerca de 200 indústrias de joalheria e ourivesaria, mais de 300 indústrias de bijuterias, uma rede de, aproximadamente, 13 mil empresas de varejo e cerca de 600 empresas de comércio atacadista de metais preciosos, pedras preciosas e relógios. O setor de gemas e metais preciosos, em Minas Gerais, é responsável pela geração de mais de 150 mil empregos diretos e apresenta uma tendência para aumentar a exportação de produtos de maior valor agregado, tais como pedras lapidadas e joalheria em ouro, demonstrando uma capacidade, mesmo que tímida, de reverter o quadro em relação a uma situação em que ocorre exportação de materiais em bruto.

Associativismo e sinergia

Em Minas Gerais, iniciativas importantes têm surgido para o desenvolvimento do setor de gemas e jóias nas áreas de microfusão de metais nobres; tratamento de gemas, design de gemas e de jóias, capacitação de recursos humanos em joalheria, ourivesaria, gestão empresarial, incluindo curso de pós-graduação em design de jóias. São tantas as entidades imbuídas em um esforço integrado para o desenvolvimento desse segmento, que vale a pena citar algumas siglas: AJOMIG; CDTN; COMIG; CPRM; FAPEMIG; FIEMG; IBGM; SBG; SEBRAE; SECT-MG; SECTUR; SEICT; SEME; SENAI; SEPLAN-MG; SINDIJOIAS-GEMAS/MG; UEMG; UFMG e UFOP.

Ainda assim, a literatura brasileira alusiva ao setor de gemas e jóias é mais rara do que as nossas pedras preciosas. Dessa forma, o lançamento desse livro, que aborda desde a origem, localização e tratamentos das nossas gemas até a sua aplicação na joalheira - em que o design é a expressão máxima da grandeza da nossa riqueza mineral - é de grande importância para o despertar de novas mentes que documentem para a posteridade aquilo que vem surgindo das entranhas da terra, uma vez que mineral somente dá uma safra.

Os registros das primeiras descobertas de gemas no Estado de Minas Gerais datam de 1554, quando ocorreram as primeiras Entradas e Bandeiras que percorreram o interior do Brasil em busca de ouro e outras riquezas. Existem informações do início da produção de topázio na região de Ouro Preto em meados do século XVIII. Recentemente, no fim da década de setenta do século passado, foi tornada pública a descoberta das famosas esmeraldas brasileiras, na região de Itabira.

Esses dados mostram de maneira irrefutável a grande 'fertilidade' das gemas no nosso Estado, sendo também um forte indicador de que novidades nesse segmento sempre estarão fazendo parte da nossa história.

Hoje, Minas Gerais mantém a posição de liderança na produção das tradicionais turmalinas e águas-marinhas, além de diversas outras gemas, como é o caso dos topázios e crisoberilos. Essas gemas, desde as primeiras descobertas, foram um dos mais eficazes instrumentos de divulgação nacional e internacional do Brasil.

Gemas de Minas Gerais é um livro que, construído com a visão de diversos pesquisadores, geocientistas e profissionais do setor, apresenta, de maneira clara, o quadro gemológico do Estado.

O atual conjunto de informações gemológicas, além de serem escassas, encontra-se disperso e com divulgação extremamente tímida, não valorizando essa histórica riqueza de Minas Gerais.

Parabenizo a Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Minas Gerais, que cumpre importante papel ao promover a realização desta obra, cuja finalidade primordial é integrar e revisar os dados existentes na produção científica sobre gemologia no Estado de Minas Gerais.

Marcelo Arruda Nassif
Diretor de Desenvolvimento Mineral
Companhia Mineradora de Minas Gerais - COMIG

A g r a d e c i m e n t o s

Os autores deste livro agradecem a:

Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo Minas Gerais- SBG-MG; UNICENTRO Newton Paiva; Companhia Mineradora de Minas Gerais - COMIG; Associação dos Joalheiros, Empresários de Pedras Preciosas, Relógios e Bijuterias de Minas Gerais - AJOMIG; Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos - IBGM; Itagemas; Escola de Design da Universidade Estadual de Minas Gerais - UEMG; Newton de Paiva; Odilon Araújo; Kalil Elawar; Maisa Elawar; Osvaldo Castanheira; Beatriz Hutzler Artel; Maria Silvia Dantas; Luiz Antônio Prazeres; Dirceu M. Vizeu; Ester Figueiredo de Oliveira; Fernando Roberto Mendes Pires; Leonardo Lagoeiro; Márcia Moura Abraão, Marco Antônio Fonseca; Nilson Francisquini Botelho; Norma Moller de Freitas; Sara Lais Rahal Lenharo; Mariana Misk; Patrícia Caetano; Rafael Neder; Fabrício Castello Branco Coelho.

Índice



14

Prefácio

Cristiane Castañeda &
Antônio Carlos Pedrosa Soares



16

capítulo um

A Província Gemológica Oriental do Brasil

Antônio Carlos Pedrosa Soares, Claiton Piva Pinto,
Custódio Netto, Mário Conceição Araújo,
Cristiane Castañeda, Adriana Borrelli Achtschin &
Márcio Silva Basílio



34

capítulo dois

Gemas de Cascalhos e Aluviões

João Eduardo Addad



52

capítulo três

Tratamento em Gemas

Maurício Favacho, Antonio Liccardo &
Cristiane Castañeda



74

capítulo quatro

Preenchimento de Fraturas em Esmeralda

Gabriel de Oliveira Polli



100

capítulo cinco

Berilo

Antonio Luciano Gandini, Adriana Borrelli Achtschin,
Vitória Régia P.R.O. Marciano, Rosa Fernandes Bello &
Antônio Carlos Pedrosa Soares



128

capítulo seis

Esmeralda

Júlio César-Mendes & Maria Sílvia Carvalho Barbosa



152

capítulo sete

Turmalina

Cristiane Castañeda, Júlio César-Mendes &
Antônio Carlos Pedrosa Soares



180

capítulo oito

Topázio

Júlio César-Mendes, João Eduardo Addad,
Antonio Liccardo & Antonio Luciano Gandini



196

capítulo nove

Crisoberilo

Márcio Basílio, Júlio César-Mendes & Antonio Liccardo



220

capítulo dez

Quartzo

Maurício Favacho



234

capítulo onze

Coríndon

Antonio Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista



260

capítulo doze

Design de Jóias

Maria Bernadete Santos Teixeira

P r e f á c i o

As gemas têm sido objeto de inspiração e fascinação há milhares de anos. O desejo por jóias e adornos tem sido compartilhado pelos povos desde a Antigüidade. Anéis, amuletos da sorte e símbolos do poder real refletem a alquimia e a tradição do ato de se enfeitar, dos rituais de magia e de adoração, os quais atravessaram os tempos e permanecem até hoje.

Denomina-se gema todo mineral que se caracteriza por alta dureza, raridade e beleza única. Beleza tal que pode ser percebida em estado bruto, realçada através da lapidação e manifestar-se de modo ímpar na forma de jóia.

Gemas de Minas Gerais aborda, sob uma perspectiva de divulgação técnico-científica, a realidade e o potencial gemológico de Minas Gerais. Uma das maiores e mais ricas províncias gemológicas do planeta situa-se em território mineiro. Tal variedade de gemas abraça miríade de cores tão grande, que cobre todo o espectro de decomposição da luz branca ao passar por um prisma.

Os interesses pelas gemas e a confecção de jóias aconteceram simultaneamente. Em decorrência disso, especialistas da indústria e do comércio de gemas reconheceram a necessidade de um maior conhecimento técnico sobre elas. Esse interesse tem levado a todo tipo de publicações, desde livros técnicos básicos até artigos científicos altamente especializados.

Desde Vupabuçu, "a lagoa forrada de ouro e pedras preciosas do imaginário nativo", as gemas de Minas têm sido objeto de desejo, cobiça, aventura e investimento financeiro. Há três séculos, as gemas de Minas têm sido extraídas, desde o diamante da Serra do Espinhaço às pedras coradas do Nordeste mineiro.

Contudo, o investimento no conhecimento técnico-científico sobre as jazidas e suas gemas não acompanhou, com tal fartura, os tempos de abundância, da pedra fácil à flor da terra. Por isso, apesar do conhecimento geológico e mineralógico que se acumulou desde o início do século XX, apenas nas duas últimas décadas verifica-se notável incremento no volume de informações de interesse da gemologia.

Todo esse conjunto de informações gemológicas encontrava-se disperso, tendo sido freqüentemente pouco divulgado ou mesmo restando inédito. Este livro promove a revisão, atualização e integração dos dados disponíveis de maneira original na produção técnico-científica sobre gemologia no Estado de Minas Gerais.

Na busca do interesse dos mais diversos leitores, Gemas de Minas Gerais mescla informação técnica com ilustrações variadas e pretende, também, atender a parte da demanda de livros-texto sobre gemologia para cursos médios e universitários.

Para se compreender a raridade das gemas, deve-se primeiro conhecer as sutilezas de suas origens, cujas particularidades propiciam, através do tempo geológico e da dinâmica terrestre, a transformação das propriedades físicas e químicas de minerais em suas variedades gemológicas. As gemas são sempre produtos únicos devido a sua origem natural, nenhuma espécie é exatamente igual a outra. Por isso, os dois primeiros capítulos são destinados a esse assunto.

Tudo aquilo que a geologia não conseguiu fazer a gosto do comércio, o homem está tentando melhorar através de técnicas especiais de melhoramento e embelezamento. Essas técnicas estão sintetizadas nos capítulos 3 e 4.

A maioria dos capítulos está destinada à apresentação das principais gemas encontradas no Estado de Minas Gerais. São elencados, em cada capítulo, uma pequena introdução do histórico dessas raridades, sua geologia e sua mineralogia, com diferentes enfoques sobre prospecção, ocorrência, variedades gemológicas e causas de cor.

Finalmente, o último capítulo é dedicado ao produto final, a jóia, elaborado a partir dos mais modernos conceitos de design pela Escola de Design da Universidade Estadual de Minas Gerais, que vem atuando, com especial envolvimento, na área da gemologia.

Todos os capítulos possuem vasta bibliografia, que, além de servir de base para os trabalhos dos autores ao longo do tempo, é fonte de referência para estudos posteriores ou aprofundamentos que o leitor achar necessário.

A maioria das fotografias foram concebidas e selecionadas especialmente para ilustrar os capítulos deste livro. Muitas dessas fotografias foram tomadas ao longo dos anos de estudo em trabalhos de campo dos autores. Gemas de Minas Gerais teve o grande privilégio de contar com uma das mais belas, raras e completas coleções de gemas do Brasil, a coleção particular do Sr. Kalil Elawar, de Teófilo Otoni. Jóias e amostras de coleção exibidas em joalheirias de Ouro Preto também ilustram este livro.

capítulo um



A Província Gemológica Oriental do Brasil

Antônio Carlos Pedrosa Soares

Claiton Piva Pinto

Custódio Netto

Mário Conceição Araújo

Cristiane Castañeda

Adriana Borrelli Achtschin

Márcio Silva Basílio

I n t r o d u ç ã o

Esse capítulo, que tem por objetivo fundamental contribuir para o conhecimento da localização e origem das jazidas de gemas da Província Gemológica Oriental do Brasil, aborda a geologia de uma das maiores concentrações de depósitos de gemas do planeta.

As gemas mais importantes da Província Gemológica Oriental do Brasil são variedades de berilo (esmeralda, água-marinha, morganita e heliodoro), turmalinas, alexandrita, crisoberilo, topázio incolor a azul e variedades de espodumênio (kunzita e hiddenita). Grande variedade de peças de coleção, minerais para a indústria cerâmica e vidreira (feldspato potássico, albita), outros minerais industriais (mica, quartzo) e minérios diversos (espodumênio, petalita, ambligonita, berilo, columbita-tantalita e cassiterita) encontram-se, também, em muitos depósitos gemíferos da província.

Como este texto é dirigido a público amplo, buscou-se amenizar a linguagem geológica e evitar referências a estudos analíticos sofisticados, embora os dados decorrentes desses estudos e de trabalhos de campo sejam a base fundamental de toda a abordagem. Trata-se, portanto, de um relato factual e objetivo, que evita interpretações aprofundadas acerca da evolução geológica regional.

Entretanto, a terminologia geológica é importante para ampliar a compreensão daqueles que não são especialistas nessa área de conhecimento, mas que têm interesse na pesquisa e produção de gemas. Os objetos, por exemplo, minerais e rochas, e os processos geológicos, como sedimentação, magmatismo e metamorfismo, dentre outros, têm seus próprios nomes e definições.

Por isso, não há como se referir, por exemplo, a um pegmatito sem chamá-lo por esse nome, que tem o mesmo significado técnico em todo o mundo e se escreve de forma similar em idiomas diversos, a não ser que se adote o jargão do garimpo, que possui grandes variações locais e pessoais, além de ser carregado de conceitos equivocados. Contudo, palavras e expressões do jargão do garimpo são utilizadas como ilustração para os termos geológicos e encontram-se em *itálico* e entre aspas.

Em Geologia, é comum o uso de nomes de cursos d'água, como Grupo Rio Doce; cidades ou vilas, como Formação Capelinha; serras, por exemplo, Supergrupo Espinhaço; e outros referenciais geográficos, como Província Gemológica



Oriental do Brasil, para designar conjuntos de rochas e de depósitos minerais, cadeias de montanhas que existiram no passado, por exemplo, Faixa Araçuaí, e outros conjuntos de objetos geológicos. Os conjuntos de rochas assim definidos ocorrem nos locais dos referenciais geográficos que lhes dão nome, mas podem também se estender por amplas regiões ou ser encontrados em áreas completamente isoladas da localidade-tipo. Às vezes, para facilitar o entendimento de conjuntos de rochas similares que receberam nomes geográficos diversos, são utilizadas denominações informais, como Suíte G1. Dos trabalhos de mapeamento de campo, com o apoio de estudos laboratoriais, resultam os mapas geológicos que mostram a distribuição, extensão e limites dos diversos conjuntos de rochas de uma região.

Para se compreender os processos geológicos, como aqueles que originam concentrações de gemas, é necessário se ter a percepção de que o tempo geológico é muito longo e de que minerais e rochas podem gastar muito tempo para se formarem e para serem expostos na superfície do Terra. A maioria dos processos que origina rochas em locais profundos da crosta terrestre, expõem posteriormente na superfície do planeta e aí a transformação em solo é muito lenta. 'Água mole em pedra dura tanto bate até que fura' é um ditado popular que bem traduz a lentidão do tempo geológico.

O tempo geológico é referido em milhões e bilhões de anos. Dessa forma, 'Ma' significa milhão de anos (por exemplo: 500 Ma = quinhentos milhões de anos) e Ga refere-se a bilhão de anos (por exemplo: 2,5 Ga = dois e meio bilhões de anos, ou seja, dois mil e quinhentos milhões de anos).

As divisões do tempo geológico aqui referidas são Arqueano (idade maior que 2,5 Ga), Paleoproterozóico (idade entre 2,5 Ga e 1,6 Ga), Mesoproterozóico (idade entre 1,6 Ga e 1 Ga), Neoproterozóico (idade entre 1 Ga e 570 Ma), Cambriano (idade entre 570 Ma e 500 Ma), Cenozóico (idade menor que 65 Ma), Terciário (idade entre 65 Ma e 2 Ma) e Quaternário (idade menor que 2 Ma).

Por se tratar de um texto de divulgação técnico-científica, neste capítulo foram reduzidas as citações bibliográficas. A bibliografia utilizada está listada ao final do capítulo e nos trabalhos ali citados encontra-se grande fonte de referências bibliográficas.

Conceitos e Processos

O conceito Província Gemológica Oriental do Brasil surgiu no artigo de Pinto & Pedrosa-Soares (2001), referindo-se a agrupamentos de depósitos de gemas situados na região delimitada, aproximadamente, pelo meridiano 43°30' W e o litoral brasileiro, entre os paralelos 15° e 21° S. De fato, não é toda essa ampla região que contém jazidas das gemas aqui referidas, ou seja, esses depósitos encontram-se em locais que têm características específicas em função de sua constituição rochosa e história geológica.

A Província Gemológica Oriental do Brasil situa-se e teve sua origem no território da Faixa Araçuaí (ver sínteses, por exemplo, em Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000; Pedrosa-Soares *et al.* 2001). Essa faixa orogênica representa uma antiga cadeia de montanhas que evoluiu no intervalo de tempo entre 625 Ma e 500 Ma. Obviamente, depois de centenas de milhões de anos de erosão, nada mais resta do relevo original dessa cadeia de montanhas, cuja existência pretérita é demonstrada pelas características das rochas, suas estruturas e suas idades.

Nesse contexto, a Província Gemológica Oriental do Brasil engloba somente os depósitos de gemas que se formaram naquele intervalo de tempo, isto é, 625 Ma a 500 Ma, no território da Faixa Araçuaí. Em função dessa definição, o diamante deixa de ser aqui abordado.

A designação 'província oriental' foi, anteriormente, aplicada no sentido de província pegmatítica (ver histórico e detalhes em Correia-Neves *et al.* 1986). Entretanto, o mapeamento geológico e estudos científicos hoje disponíveis permitem muito maior



detalhamento e sistematização no agrupamento dos depósitos de gemas aqui abordados.

As jazidas primárias de gemas da Província Gemológica Oriental são pegmatitos e depósitos hidrotermais. Os depósitos secundários encontram-se em aluviões, solos residuais (elúvios) e solos coluvionares. Este capítulo trata apenas das jazidas primárias.

Pegmatito significa rocha que contém grandes cristais. Simplificadamente, os pegmatitos graníticos são rochas de granulação grosseira, compostas essencialmente por feldspato potássico (microclina ou ortoclásio) e quartzo. Dentre outros minerais encontrados em pegmatitos, estão a albita e sua variedade cleavelandita, micas (moscovita, biotita, lepidolita), turmalinas, variedades de berilo, granada, apatita, monazita, amblygonita-montebrazita, variedades de espodumênio, topázio, petalita, crisoberilo, herderita, cassiterita, columbita-tantalita e polucita.

Os pegmatitos são rochas com granulação predominante maior que 2,5cm e que apresentam ampla variação de tamanhos de cristais. Há cristais de feldspato, quartzo e berilo, por exemplo, que atingem metros de comprimento e toneladas de peso. A granulação varia muito de uma a outra unidade interna de um pegmatito, se ele for zonado, ou pode ser grosseiramente homogênea, se o corpo não apresentar zonamento interno bem desenvolvido.

Geneticamente, os pegmatitos são originados por dois processos distintos. Um deles é a fusão parcial de rochas da crosta terrestre, com composição adequada para gerar líquidos silicatados de composição granítica. Esse tipo de pegmatito, denominado pegmatito anatético, muito raramente contém gemas; eventualmente, pode ter berilo e amazonita.

O outro processo gerador de pegmatito é o final da cristalização de corpos graníticos intrusivos, isto é, grandes volumes de magma granítico que ascendem na crosta terrestre, 'perfuram' as rochas hospedeiras e se cristalizam lentamente. A cristalização dos corpos graníticos intrusivos termina em resíduos fluidos (gasosos e líquidos) de naturezas e composições diversas. Nesse caso, estão os pegmatitos residuais que representam, de fato, a grande maioria das jazidas importantes de gemas como turmalinas, água-marinha,摩根ita, kunzita, topázio azul a incolor, e heliodoro, dentre outras.



Foto 1. Exemplo de corpo granítico intrusivo da Suíte G5, esculpido em relevo do tipo pão-de-açúcar, no Distrito Gemológico de Pedra Azul. (Foto cedida pela Prof. Maria de Lourdes Souza Fernandes, UFMG - IGC).



Pegmatito residual é o resultado da lenta cristalização de um líquido silicatado (o magma pegmatítico) enriquecido em elementos como boro, berílio, lítio e outros, e substâncias voláteis, principalmente água e flúor. Pegmatitos residuais podem se cristalizar dentro dos próprios granitos geradores ou podem migrar para fora do corpo granítico. O perfil esquemático de um granito intrusivo ilustra isso e, em sua legenda, há indicações das principais gemas que, potencialmente, ocorrem em pegmatitos internos, marginais e externos ao granito gerador (Figura 1).

Os volumes de magma pegmatítico que escapam do granito gerador podem ser de tamanhos os mais variados. Obviamente, o magma pegmatítico 'escolhe' os caminhos mais fáceis para se movimentar. Esses caminhos são as superfícies preferenciais (xistossidade, fraturas, foliação gnáissica) das rochas encaixantes, nas quais encontram-se hospedados os pegmatitos. À medida que o magma pegmatítico migra, ele também se resfria e aumenta de viscosidade, até parar de se movimentar, cristalizando-se como um sistema fechado, ou seja, um pegmatito residual cristaliza-se como um sistema químico que troca quantidade insignificante de substâncias com a rocha hospedeira.

O alojamento e a cristalização de granitos e pegmatitos aconteceram na Província Gemológica Oriental em profundidades que variaram entre 6km e 30km, há mais de 500 Ma. Entretanto, a erosão que tem ocorrido neste longo período de tempo fez aparecer, na superfície do relevo atual, muitos dos granitos geradores e seus pegmatitos (Figura 2). Muitos outros, certamente, nem sequer afloram ainda na superfície do relevo ou, simplesmente, encontram-se encobertos pelo solo (Foto 1).

Por isso, os garimpeiros buscam identificar o que chamam '*aroto da linha*', ou seja, fragmentos de feldspato, mica e turmalina misturados ao solo, como indício para orientar escavações visando encontrar um pegmatito encoberto. Há, contudo, técnicas geológicas e geofísicas muito mais precisas, que permitem detectar a presença de pegmatitos encobertos pelo solo ou situados em profundidade considerável.

Os pegmatitos homogêneos ou não-zonados têm, geralmente, espessura menor que 1m (Foto 2). Apesar de não apresentarem zonamento distinto, estes pegmatitos mostram freqüentemente variações de granulação, de tal foma que os cristais maiores tendem a se concentrar no centro do corpo. A maioria dos pegmatitos produtores de água-marinha da Província Oriental são desse tipo.

Os grandes pegmatitos são geralmente zonados e constituídos por vasta gama de minerais, além de feldspatos, quartzo e moscovita. Por isso são denominados pegmatitos complexos. A espessura desse tipo de pegmatito pode variar entre poucos metros a mais de uma centena de metros, mas em geral situa-se entre 10m e 50m. O comprimento ao longo da direção do corpo também varia muito, de dezenas de metros a alguns quilômetros, sendo mais comuns os valores entre 100 e 500m.

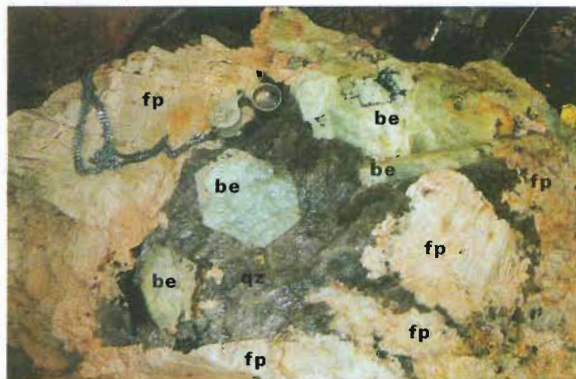
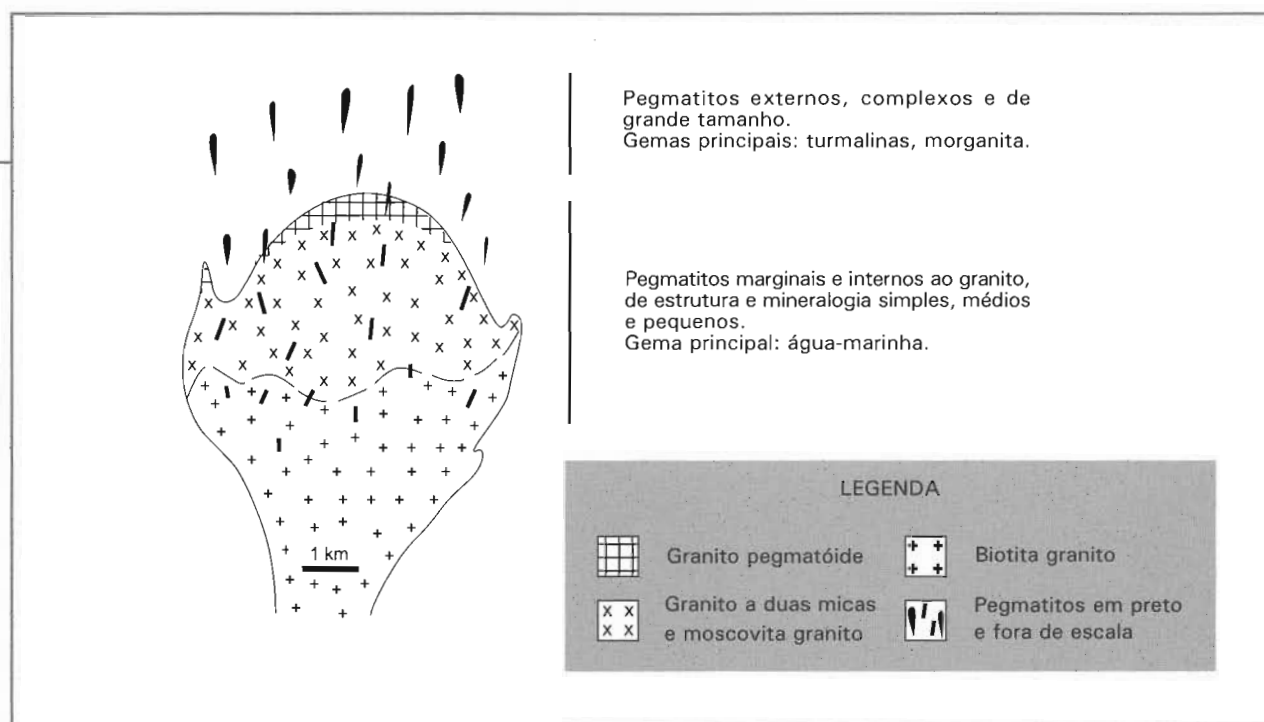


Foto 2. Pegmatito homogêneo, composto de feldspato potássico (fp), berilo (be) e quartzo (qz). O cristal de berilo com forma hexagonal (seção basal), situado no centro da foto, tem 6cm de diâmetro médio. Foto tomada no Distrito Gemológico de Padre Paraíso (Achtschin 1999).



Figura 1. Esquema, em perfil, de um corpo granítico da Suíte G4 e da distribuição dos seus pegmatitos.



A estrutura interna de um pegmatito zonado é constituída de zonas primárias, corpos de substituição, preenchimentos de fratura e geodos. As zonas primárias, denominadas marginal, mural, intermediária e núcleo, formam-se por cristalização fracionada do magma pegmatítico (Figura 3).

Resíduos silicatados enriquecidos em vapor d'água, sódio, boro, berílio, lítio e flúor são segregados à medida que o magma pegmatítico se resfria e se cristaliza. Esses resíduos são quimicamente reativos e, por isto, reagem com minerais das zonas primárias formando os corpos de substituição. As palavras 'linha' ou 'caldeirão' são denominações garimpeiras para corpo de substituição.

Durante a cristalização do pegmatito formam-se fraturas devido à contração da massa silicatada em resfriamento (Foto 4). Essas fraturas podem ser preenchidas pelo material residual que se cristaliza na forma de albita, moscovita, lepidolita, turmalinas e outros minerais. Preenchimento de fratura é denominado 'linha' ou 'frincha' no jargão do garimpo. Corpos de substituição e preenchimentos de fratura geralmente se conectam e chegam a se confundir. Ambos são de extrema importância para guiar a exploração de gemas e podem ser depósitos ricos em turmalinas e morganita, dentre outras gemas (Foto 5).

Geodos ou 'caldeirões' são locais onde as substâncias voláteis se acumulam muito, à semelhança de bolhas (Foto 6). De fato, os geodos apresentam espaços vazios e podem conter muita água e barro. Os geodos são forrados por minerais como albita, geralmente na forma de cleavelandita, cristais de quartzo ('lambreu' ou 'jacaré'), lepidolita, turmalinas verde, azul, rosa, bicolor e multicolor, morganita e muitos outros minerais valiosos, seja como gemas, peças de coleção ou minerais ornamentais.

Na figura que ilustra exemplos de formas e estruturas internas de pegmatitos zonados, observa-se que corpos de substituição, preenchimentos de fratura e geodos tendem a se concentrar na parte superior dos pegmatitos. Tal fato se deve à migração das substâncias voláteis para as partes superiores dos pegmatitos, durante o processo de cristalização do magma pegmatítico. Esse efeito é muito acentuado quando o pegmatito tem mergulho de alto ângulo a vertical.

Figura 2. Perfil esquemático dos arredores de Coronel Murta, mostrando diferentes níveis de erosão de granitos e pegmatitos da Suíte G4.

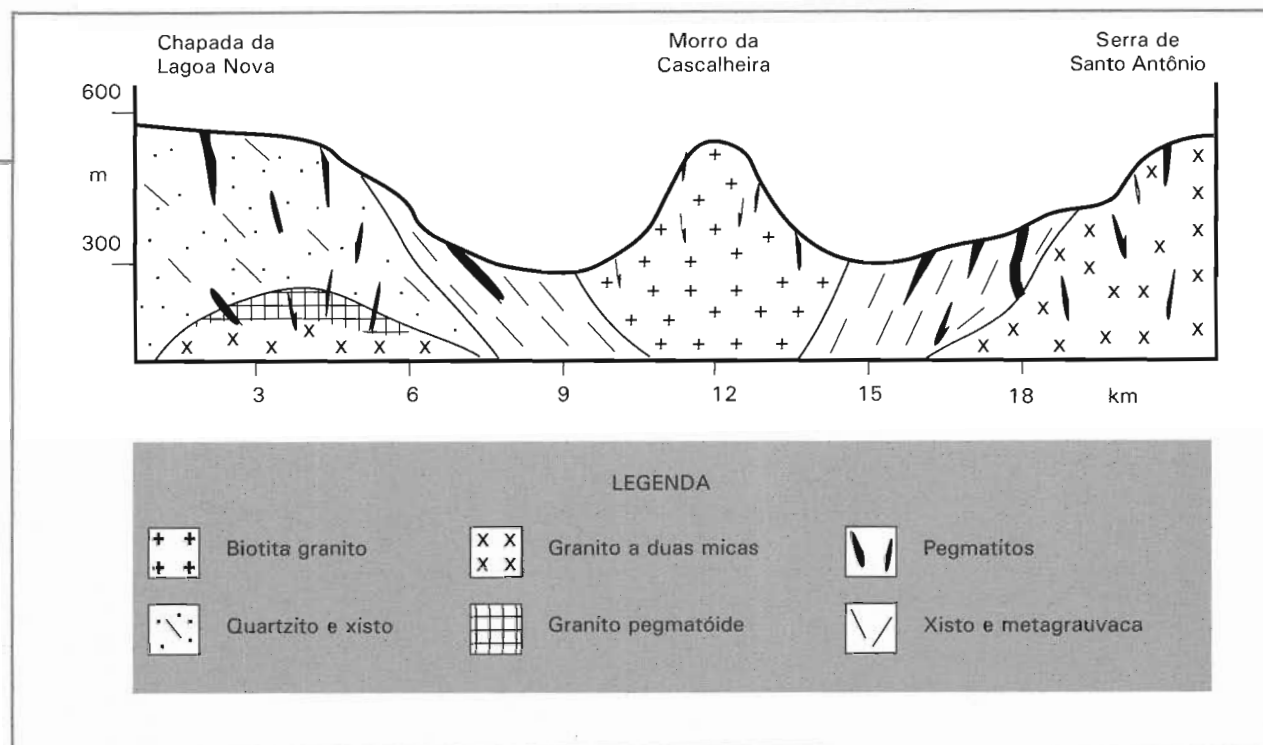
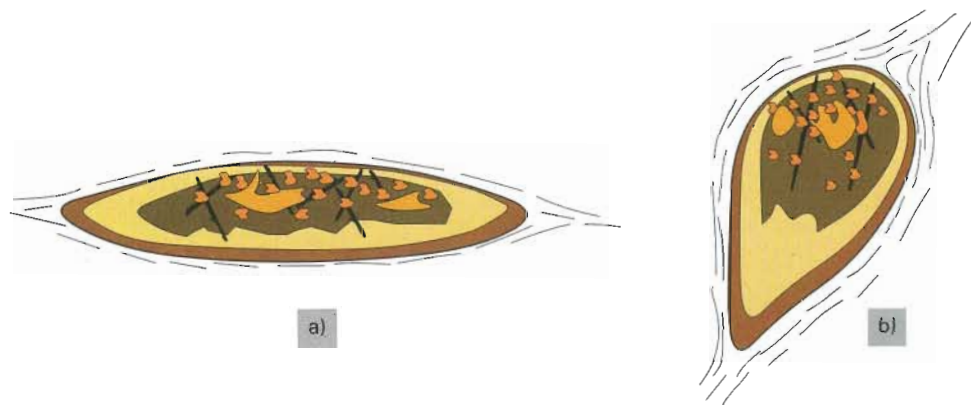


Foto 3. Unidade constituída de albita e turmalina negra do Pegmatito Morro Redondo, município de Coronel Murta, Distrito Gemológico de Araçuaí (Castañeda 1997). Essa unidade é o principal guia ou 'linha' na exploração desse pegmatito. Ela representa um conjunto de preenchimentos de fratura e corpos de substituição, situados na zona intermediária do pegmatito. O martelo que serve de escala tem 33cm de comprimento.



Figura 3. Exemplos de formas e estruturas internas de pegmatitos zonados. As classes de granulação são fina, menor 2,5cm; média, entre 2,5cm e 10cm; grossa, entre 10cm e 30cm; e muito grossa, maior que 30cm.



Os depósitos hidrotermais podem também estar relacionados a episódios de geração de granitos. Ao contrário dos pegmatitos residuais, os depósitos hidrotermais são o resultado de expressivas adições e/ou subtrações de componentes químicos, por meio da migração de fluidos aquosos de alta a baixa temperatura, por isso chamados hidrotermais, desde curtas a longas distâncias. Os fluidos aquosos que partem do granito reagem com as rochas encaixantes, misturam-se a substâncias dessas rochas e se cristalizam à medida que diminuem de temperatura, tendendo a preencher locais preferenciais, como dobras, fraturas e foliações.

As jazidas primárias de esmeralda e alexandrita da Província Oriental são depósitos hidrotermais, apesar de sua eventual aparência 'pegmatítica' que decorre de sua associação com rocha quartzo-feldspática grosseira. Contudo, esses depósitos formaram-se pela combinação de elementos químicos derivados de fontes geológica e quimicamente antagônicas, tais como rochas ultramáficas e granitos. As rochas ultramáficas forneceram o cromo, que é o elemento causador da cor da esmeralda e do efeito alexandrita no crisoberilo. O berílio, elemento essencial desses minerais, foi provido por granitos.



Foto 4. Preenchimentos de fraturas ricos em turmalina rosa no Pegmatito Morro Redondo, município de Coronel Murta (Castañeda 1997). Esses preenchimentos de fraturas cortavam a unidade de albita e turmalina negra, antes de serem completamente extraídos.

Foto 5. Minério de turmalina do Pegmatito Morro Redondo, município de Coronel Murta (Castañeda 1997). Esse pegmatito produziu mais de 20 toneladas de turmalina rosa e verde.



Geologia da Província Gemológica Oriental

25

O mapa geológico da Província Gemológica Oriental do Brasil, apresentado neste livro (Figura 4, Tabela 1), é uma modificação do mapa publicado em Pedrosa-Soares *et al.* (2001), que, por sua vez, resultou da compilação de mapas geológicos produzidos pelos projetos Espinhaço (convênio UFMG-COMIG) e Leste (convênio CPRM-COMIG), e por projetos de pesquisa científica e teses de universidades (principalmente UFMG, UFOP, UFRJ, USP e UnB). Em publicações de pesquisadores dessas universidades, da CPRM-Serviço Geológico do Brasil e da Companhia Mineradora de Minas Gerais, encontra-se a quase totalidade dos dados que permitiram, juntamente com o mapa geológico compilado, delinear o cenário geológico apresentado adiante.

Figura 4. Mapa Geológico da Província Gemológica Oriental do Brasil (modificado de Pedrosa-Soares *et al.* 2001).

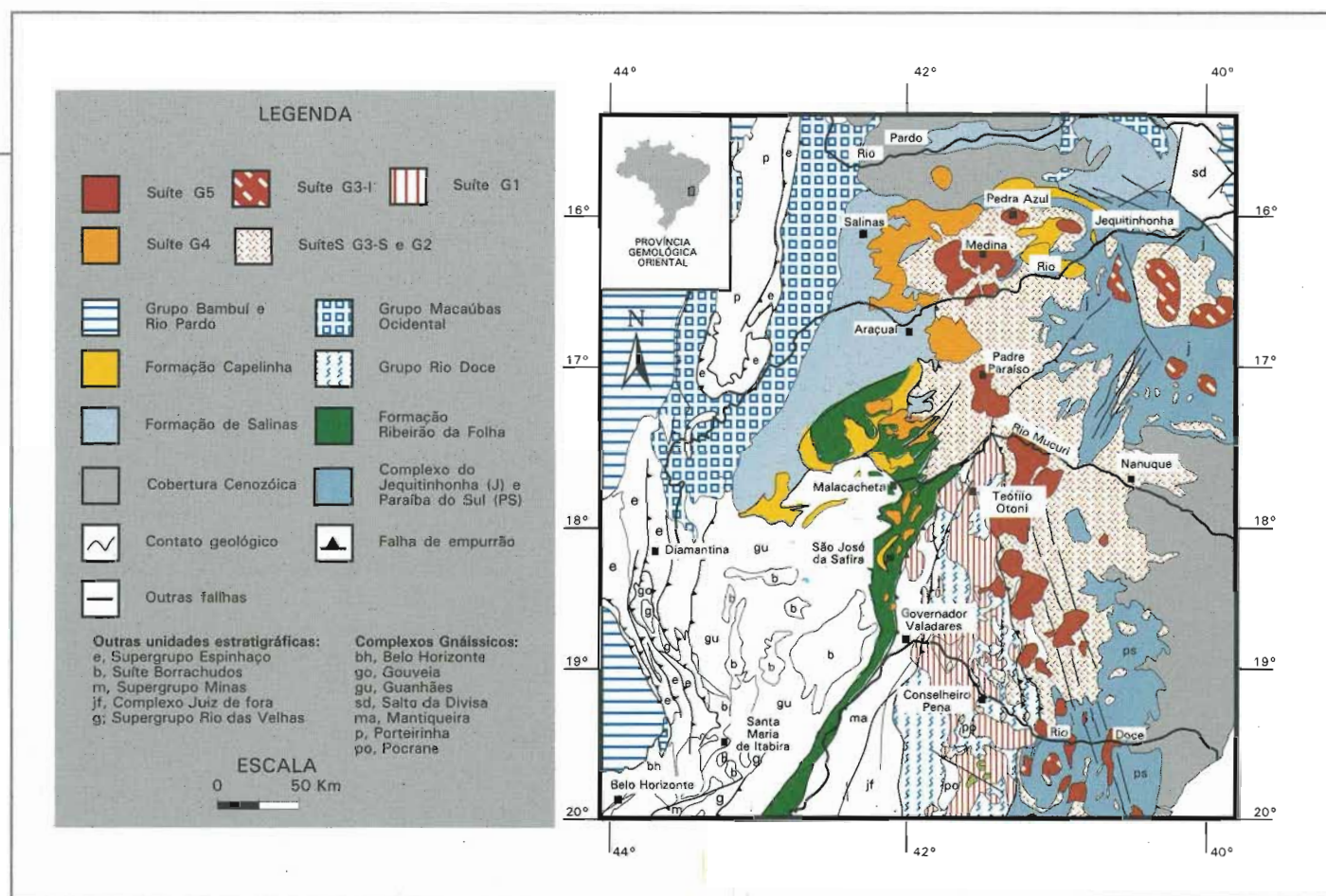


Tabela 1

Unidades estratigráficas representadas no mapa geológico.

Unidade	Principais rochas	Idade
Coberturas Cenozóicas	Rochas sedimentares e sedimentos detríticos, solos eluviais e coluviais	Terciário e Quaternário
Suíte G5	Biotita granito e charnockito	530 - 500 MA
Suíte G4	Granito a duas micas	530 - 500 MA
Suíte G3-S	Granito com granada e cordierita	580 - 560 MA
Suíte G3-I	Biotita granito	585 - 570 MA
Suíte G2	Granito a duas micas	530 - 500 MA
Suíte G1	Tonalito e granodiorito gnaissificados	625 - 585 MA
Grupos Bambuí e Rio Pardo	Calcário, dolomito, pelito, arenito e conglomerado, metamorfoseados	Neoproterozóico
Formação Capelinha	Quartzito, micaxisto e xisto grafitoso	Neoproterozóico
Formação Ribeirão da Folha	Micaxisto, micaxisto feldspático, metachert, formações ferríferas, grafita xisto, anfíbolito, rocha cálcio-silicática, mármore	Neoproterozóico
Formação Salinas	Micaxisto, metagrauvaca, rocha cálcio-silicática, grafita xisto, metaconglomerado	Neoproterozóico
Grupo Rio Doce	Micaxisto, biotita gnaiss, rocha cálcio-silicática	Neoproterozóico
Complexos Jequitinhonha e Paraíba do Sul	Biotita-granada gnaiss, kinzigito, grafita gnaiss, quartzito, mármore, granulito cálcio-silicático	Neoproterozóico
Grupo Macaúbas Oriental	Metadiamictito, quartzito, filito, metapelito, formação ferrífera e mármore	
Supergrupo Espinhaço	Quartzito, metapelito, metaconglomerado, mármore, rochas metavulcânicas félsicas e máficas	Paleoproterozóico e Mesoproterozóico
Suíte Borrachudos	Granito gnaissificado	Paleoproterozóico
Supergrupo Minas	Itabirito, quartzito, filito, xisto, conglomerado, mármore	Paleoproterozóico
Complexo Juiz de Fora	Granulito, gnaiss	Paleoproterozóico
Supergrupo Rio das Velhas	Rochas metassedimentares e metavulcânicas, rochas metaultramáficas	Arqueano
Complexos Gnáissicos	Gnaiss, migmatito, granito, rochas metamáficas e metaultramáficas, formação ferrífera, quartzito	Paleoproterozóico e Arqueano



Foto6. Geodo forrado com cleavelandita (plaquetas de albita) e cristais de quartzo no Pegmatito Limoeiro, Virgem da Lapa. Distrito Gemológico de Araçuaí.

A Tabela 1 apresenta a listagem sucinta das principais rochas que constituem essas unidades e suas idades.

As principais unidades hospedeiras de depósitos de gemas, além das suítes graníticas diretamente relacionadas à sua origem (ver seção Origem e distribuição dos depósitos de gemas), são as formações Salinas, Ribeirão da Folha e Capelinha, o Grupo Rio Doce, rochas específicas do Complexo Guanhães e dos supergrupos Rio das Velhas e Minas, e corpos graníticos da Suíte Borrachudos. De pouca importância, como encaixantes de depósitos de gemas, são os complexos Jequitinhonha e Paraíba do Sul, as suítes graníticas G1 e G3-S, e a maior parte da Suíte G2.

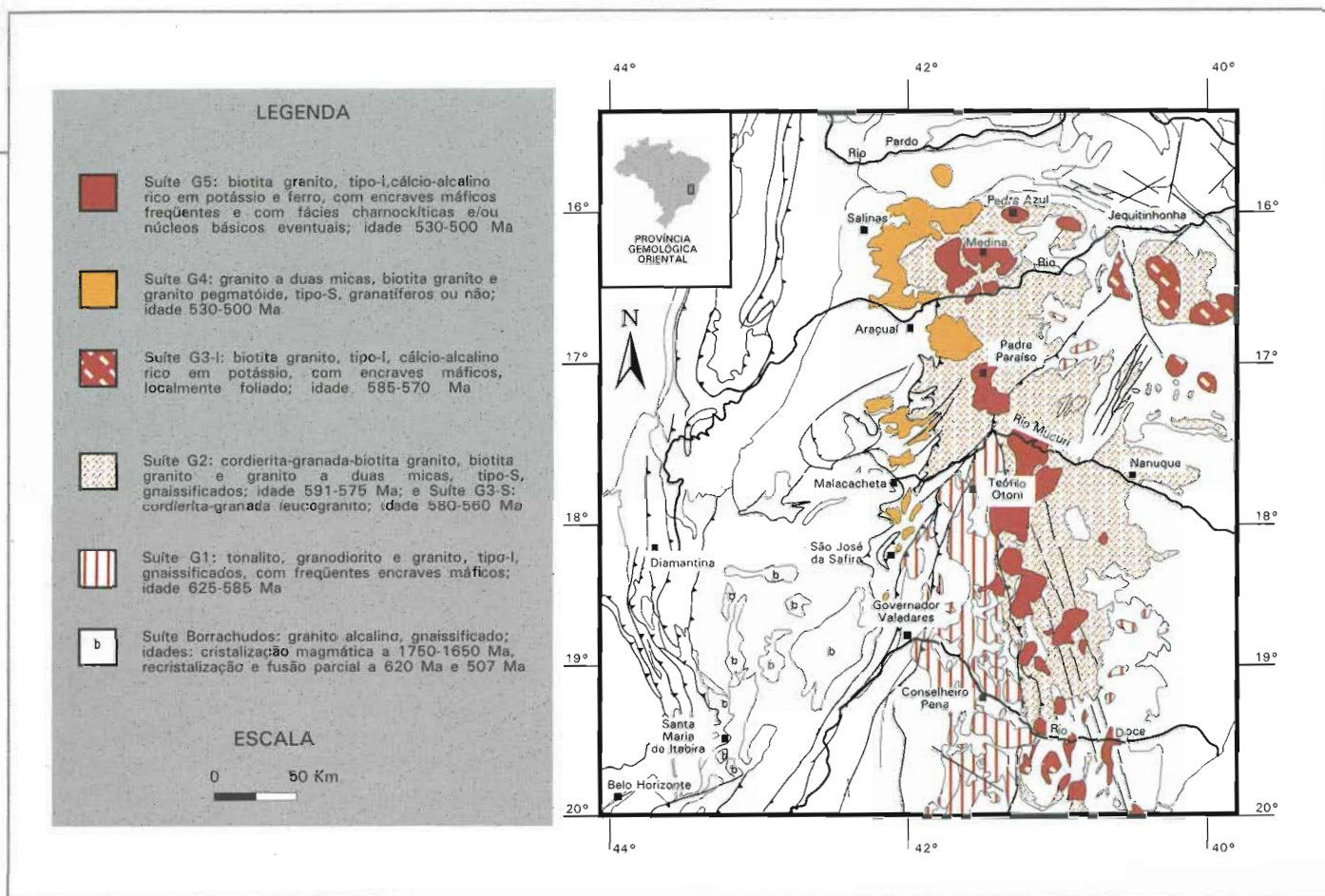
No mapa geológico da Província Gemológica Oriental, estão também representadas unidades que não geraram nem hospedam depósitos das gemas aqui abordadas. Essas unidades são os complexos Belo Horizonte, Gouveia, Juiz de Fora, Mantiqueira, Pocrane, Porteirinha e Salto da Divisa, o Supergrupo Espinhaço, os grupos Macaúbas Ocidental, Rio Pardo e Bambuí, e as coberturas cenozóicas.

Origem e Distribuição dos Depósitos de Gemas

O significativo acervo de dados hoje disponível permite relacionar a origem e a distribuição dos depósitos de gemas da Província Gemológica Oriental com episódios de geração de rochas graníticas, no final do Neoproterozóico e no Cambriano (Figura 5).

Além dessas informações, um detalhado cadastramento de depósitos de gemas da Província Oriental foi realizado pelo Projeto Leste (Pinto *et al.* 2001) e encontra-se publicado no trabalho de Netto *et al.* (2001). Nos mapas do Projeto Espinhaço (UFMG-COMIG) e no seu livro em CD-ROM (Grossi-Sad *et al.* 1997), encontram-se também informações sobre jazidas de gemas da região coberta pelo projeto, em particular dos distritos gemológicos de Araçuaí e Malacacheta.

Figura 5. Suítes Graníticas da Província Gemológica Oriental do Brasil (Modificado de Pedrosa-Soares *et al.* 2001).



As suítes graníticas originadas no intervalo de tempo entre 625 Ma e 500 Ma (suítes G1, G2, G3-I, G3-S, G4 e G5) encontram-se destacadas, em cores, no mapa 'Suítes Graníticas da Província Gemológica Oriental do Brasil'. Na legenda dessa figura estão suas descrições sucintas, incluindo características geológicas, assinaturas geoquímicas e idades. As definições e descrições detalhadas dessas suítes magmáticas encontram-se em Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000) e Pedrosa-Soares *et al.* (2001), e em trabalhos citados por esses pesquisadores. Em mapas dos projetos Espinhaço (COMIG-UFMG) e Leste (COMIG-CPRM) encontra-se a delimitação, em escala 1:100.000, dos corpos graníticos e rochas regionais aos quais se associam os depósitos de gemas.

Em torno de 625 Ma, teve início a cristalização de rochas graníticas, em níveis profundos da crosta, na Província Gemológica Oriental. O primeiro conjunto de rochas graníticas a se formar constitui a Suíte G1, que possui nomes locais, como Brasilândia, Galiléia, Guarataia e São Vitor, dentre outros. Os dados de campo e as características químicas das rochas dessa suíte evidenciam que ela não contribuiu para a geração de depósitos de gemas hoje conhecidos. Há, entretanto, pegmatitos sem importância do ponto de vista gemológico que se relacionam à Suíte G1.



Os primeiros granitos geradores de jazidas de gemas encontram-se reunidos na Suíte G2. São granitos a duas micas, de cor clara, que geralmente apresentam foliação e estão encaixados no Grupo Rio Doce e na Suíte G1, na região que engloba as cidades de Conselheiro Pena, Galiléia, Mendes Pimentel, Linópolis, Divino das Laranjeiras e outras localidades. Sua idade, em torno de 585 Ma, indica que se trata do mais antigo episódio gerador de jazidas de gemas importantes da Província Gemológica Oriental.

Esses depósitos de gemas são pegmatitos residuais derivados das intrusões graníticas do tipo Urucum e Palmital, que se encontram hospedados em micaxisto e quartzito do Grupo Rio Doce (a maior parte das jazidas importantes), nos próprios granitos geradores, em rochas da Suíte G1 e em rochas meta-ultramáficas. As principais gemas encontradas nessa região, denominada Distrito Gemológico de Conselheiro Pena, são turmalinas, água-marinha, morganita, kunzita e heddenita.

Nesse distrito, os principais depósitos de turmalinas, morganita e kunzita são pegmatitos complexos, ou seja de estrutura zonada e mineralogia muito diversificada, cujas espessuras atingem dezenas de metros. Esses pegmatitos encontram-se hospedados em micaxisto e quartzito. Devido a seu grande tamanho e diversidade mineralógica, tais pegmatitos são também importantes depósitos de peças-de-coleção e de feldspato industrial.

Desse primeiro exemplo, percebe-se que pegmatitos, quando são jazidas de gemas, têm relações muito íntimas com a geologia, associando-se a determinados granitos geradores e tendo unidades estratigráficas específicas como principais rochas hospedeiras.

Dessa forma, para mais clara visualização, apresenta-se o mapa 'Principais Distritos Gemológicos da Província Oriental', cuja legenda sintetiza as principais informações sobre os mais importantes agrupamentos de jazidas de gemas da província.

Após a formação do distrito gemológico de Conselheiro Pena, foram originados, no intervalo de tempo entre 530 Ma e 500 Ma, os de Araçuaí, Malacacheta e São José da Safira, relacionados à Suíte G4, e os distritos de Padre Paraíso e Pedra Azul, associados à Suíte G5.

Nos distritos gemológicos de Araçuaí e São José da Safira, os depósitos de gemas são pegmatitos residuais derivados de granitos da Suíte G4. No Distrito Gemológico de Araçuaí, os nomes locais dos granitos geradores de pegmatitos gemíferos são Coronel Murta, Itaporé, Mangabeiras e Piauí, dentre outros. No Distrito Gemológico de São José da Safira, os nomes locais dos granitos geradores de pegmatitos gemíferos são Baixa do Bugre e Santa Rosa, dentre outros.

Nesses distritos gemológicos, a Suíte G4 é constituída principalmente de granito a duas micas, mas biotita granito e granito pegmatóide também ocorrem. Granada e turmalina são minerais acessórios comuns nos granitos a duas micas e granitos pegmatóides. Uma foliação incipiente, causada por fluxo ígneo, é comum nos maciços de granito a duas micas e na borda dos corpos de biotita granito.

Em ambos os distritos, as rochas encaixantes dos pegmatitos gemíferos são micaxisto, quartzito, rocha meta-ultramáfica e os próprios granitos geradores. Os pegmatitos hospedados em micaxisto encaixam-se preferencialmente na xistosidade, predominando ângulos de mergulho entre 10° e 50° . Os pegmatitos hospedados em quartzito encaixam-se, principalmente, em sistemas de fraturas de alto ângulo de mergulho a verticais.

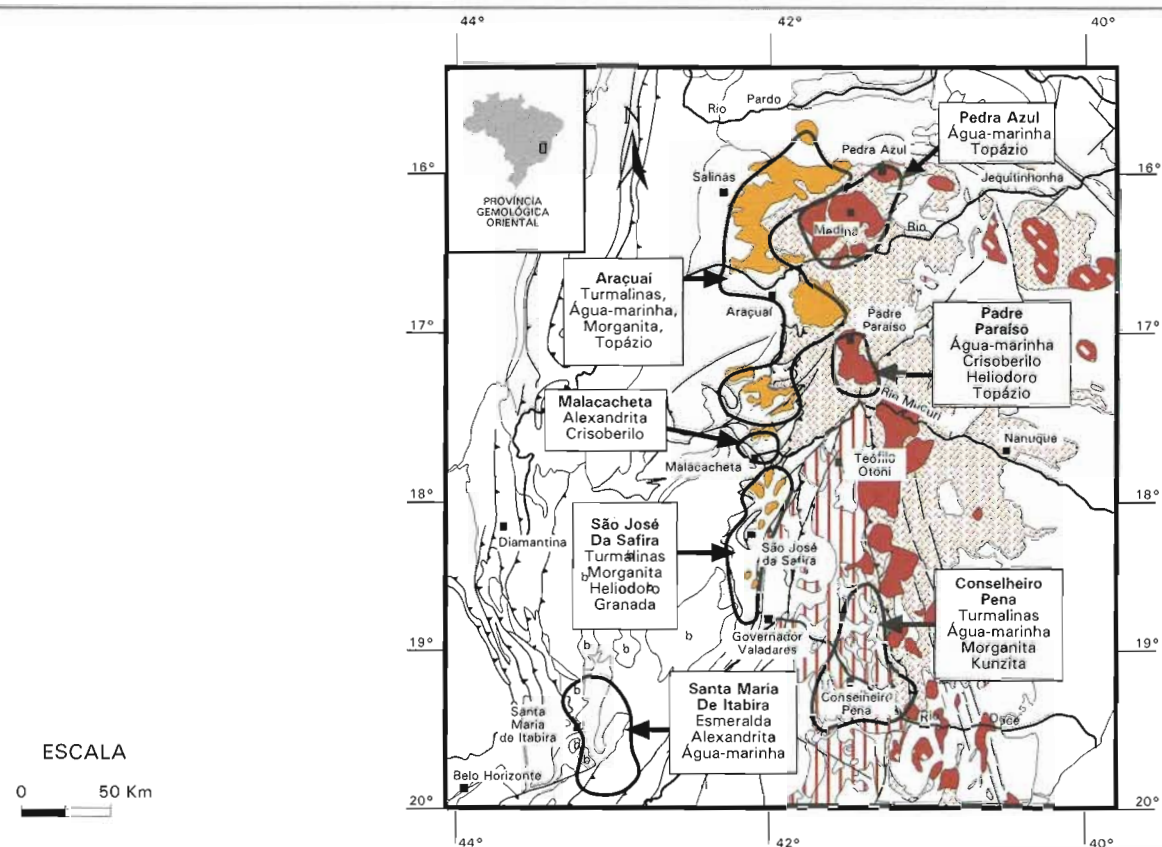
No Distrito Gemológico de Araçuaí, os pegmatitos produtores de água-marinha de alta qualidade gemológica situam-se nos maciços de biotita granito dos arredores de Coronel Murta, particularmente no Morro do Frade. Esses pegmatitos são corpos homogêneos, geralmente com espessura inferior a 1m, que se hospedam em locais ricos em biotita nos maciços de biotita granito. Entretanto, água-marinha de cor razoável é também encontrada em pegmatitos marginais e externos aos granitos.

Por sua vez, os depósitos de turmalinas, morganita, heliodoro e topázio dos distritos gemológicos de Araçuaí e São José da Safira são pegmatitos externos aos granitos geradores. Geralmente, são grandes pegmatitos, com espessuras de dezenas de metros, cuja estrutura é zonada e a composição mineralógica é muito diversificada. Por isso, são também jazidas importantes de peças de coleção e de feldspato industrial.

O Distrito Gemológico de Malacacheta caracteriza-se pela produção de alexandrita e crisoberilo, em depósitos secundários. Por isso, foi destacado dos demais distritos relacionados à Suíte G4. A rocha na qual estas gemas se originaram ainda não foi encontrada naquela região. Entretanto, devido às características do processo que dá origem à alexandrita, a rocha portadora dessa gema teria sido formada como produto de um sistema hidrotermal, envolvendo micaxisto rico em alumínio, rocha ultramáfica e o Granito Soturno.

Os distritos gemológicos de Padre Paraíso e Pedra Azul são especializados na produção de água-marinha. Os depósitos de gemas são pegmatitos residuais de intrusões graníticas pertencentes à Suíte G5. As rochas encaixantes dessas jazidas são biotita

Figura 6. Principais Distritos Gemológicos da Província Oriental (Fontes: Correia-Neves *et al.* 1986; Netto *et al.* 2001; Pinto & Pedrosa-Soares 2001).



RELAÇÕES DOS DISTRITOS GEMOLÓGICOS COM A GEOLOGIA

DISTRITOS	DEPÓSITOS	ORIGEM DOS DEPÓSITOS	ORIGEM ENCAIXANTES
P. Paraíso e Pedra Azul	Pegmatito	Granitos da suíte G5	Os próprios granitos G5 Micaxisto, quartzito, granito, rocha ultramáfica
Araçuaí e S.J da Safira	Pegmatito	Granitos da suíte G4	Interface Micaxisto/rocha ultramáfica
Malacacheta	Sistema Hidrotermal	Granitos da suíte G4 e encaixantes	Micaxisto, quartzito, granito rocha ultramáfica
Conselheiro Pena	Pegmatito	Granitos das suítes G2 (G1 e G5?)	Xisto ultramáfico, formação ferrífera
Santa Maria de Itabira	Veios termais e pegmatitos	Fusão parcial e granitogênese G2 e/ou G4	



granito e charnockito ('granito verde'), geralmente muito intemperizados e transformados em solos eluviais. Essas rochas mostram granulação grossa, encraves escuros e freqüente orientação de fluxo ígneo. No Distrito de Pedra Azul não ocorre charnockito.

Nos distritos de Padre Paraíso e Pedra Azul, os pegmatitos produtores de água-marinha de boa qualidade gemológica têm espessura geralmente inferior a 2m e são particularmente ricos em biotita. Por serem ricos em potássio e ferro, mas pobres em água, os granitos geradores dão origem a pegmatitos homogêneos ricos em biotita. Como se sabe, o ferro é o principal elemento responsável pela cor da água-marinha e a presença de biotita abundante é um indicador importante do enriquecimento em ferro.

O Distrito Gemológico de Santa Maria de Itabira destaca-se pela produção de esmeralda, alexandrita e água-marinha. Essas gemas foram originadas, principalmente, em sistemas hidrotermais resultantes da interação de rochas ricas em cromo e/ou ferro, como flogopita xisto, biotita xisto e formação ferrífera, com fluidos graníticos ricos em potássio e berílio. As rochas portadoras dessas gemas são xistos escuros (flogopita xisto, clorita xisto e biotita xisto), formação ferrífera e veios quartzo-feldspáticos. A origem dessas jazidas estaria relacionada à evolução da Faixa Araçuaí, provavelmente aos episódios de fusão parcial da crosta e granitogênese relacionados às Suites G2 e/ou G4.

Comentários Finais

Apesar de ser extremamente rica em depósitos de gemas, a Província Gemológica Oriental do Brasil vem passando por um processo gradativo de falta de investimentos e de abandono dos garimpos.

Isso, certamente, decorre do fato de que na região, há mais de dois séculos, a abordagem dos depósitos de gemas é realizada de forma muito rudimentar, sem aplicação do conhecimento geológico e de técnicas de pesquisa e lavra adequadas. A atividade de garimpagem, completamente desorganizada e injusta do ponto de vista econômico, social e ambiental, vem exaurindo e inviabilizando jazidas de gemas durante todo esse tempo.

Hoje, poucos são os depósitos de gemas relativamente fáceis de se explorar, se é que há ainda algum, como demonstra, por exemplo, o cadastramento realizado pelo Projeto Leste (CPRM-COMIG). Ou seja, parece que '*arrotos da linha*' deixaram de ser os mais importantes indícios de eventuais '*bamburros*'. isto é, grandes achados de gemas.

Enfim, espera-se que tenha chegado o momento das atividades de pesquisa e mineração, economicamente organizadas e sustentáveis do ponto de vista ambiental, entrarem em cena. Com certeza, há conhecimento geológico e muita tecnologia disponível para isto.

B i b l i o g r a f i a

C o n s u l t a d a

- Achtschin, A.B. 1999. Caracterização geológica, mineralógica e geoquímica de pegmatitos do Distrito Pegmatítico de Padre Paraíso, Minas Gerais e suas variedades de berilo. Belo Horizonte, UFMG-IGC, Dissertação de Mestrado, 120p.
- Aracema, L.A., Neves, A.C., Ferreira, J.C.H, Pedrosa-Soares, A.C., Lobato, L.M., Noce, C.M. 2000. Novas evidências de remanescentes oceânicos na Faixa Araçuaí: as rochas meta-ultramáficas de São José da Safira. *Geonomos*, 8 (1): 55-61
- Basílio, M.S., Pedrosa-Soares, A.C., Evangelista, H.J. 2000. Depósitos de alexandrita de Malacacheta, Minas Gerais. *Geonomos*, 8 (1): 47-54
- Basílio, M.S. 1999. A Alexandrita de Malacacheta, Nordeste de Minas Gerais. Ouro Preto, UFOP-DEGEO, Dissertação de Mestrado, 111p.
- Castañeda, C., Oliveira, E.F., Gomes, N.S., Pedrosa-Soares, A.C. 2000. Infrared study of OH sites in tourmaline from the elbaite-schorl series. *American Mineralogist*, 85 (10): 1503-1507
- Castañeda, C. 1997. Caracterização Mineralógica das Turmalinas do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, Minas Gerais. Ouro Preto, UFOP, Dissertação de Mestrado, ... p.
- Cassedanne, J.P. 1991. Tipologia das jazidas brasileiras de gemas. In: C. Schobbenhaus, C., E.T. Queiroz, Coelho, C.E.S. (ed.), Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília, DNPM, v. 4, p. 17-36
- Correia-Neves, J.M., Pedrosa-Soares, A.C., Marciano, V.R.P.R.O. 1996. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16 (1): 106-118
- Delaney, P.J.V. 1996. Gemstones of Brazil: Geology and Occurrences. Ouro Preto, Revista Escola de Minas, 123 p.
- Duarte, P., Dussin, T.M. 2001. A gênese de esmeraldas da região de Itabita-Nova Era. In: Simpósio Geologia de Minas Gerais, Resumos.
- Gandini, A.L. 1999. Aspectos da Mineralogia, Geoquímica, Gênese e Potencialidade Econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais. São Paulo, USP-IG, Tese de Doutorado, 261p.
- Grossi-Sad, J.H., Lobato, L.M., Pedrosa-Soares, A.C., Soares-Filho, B.S. 1997. Projeto Espinhaço. Belo Horizonte, Companhia Mineradora de Minas Gerais, Cd-rom.
- Lobato, L.M. & Pedrosa-Soares, A.C. 1993. Síntese dos recursos minerais do Cráton São Francisco e Faixas Marginais em Minas Gerais. *Geonomos*, 1: 51-64
- Marciano, V.R.P.R.O. 1995. O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG: mineralogia, geoquímica e zoneografia. São Paulo, USP-IG, Tese de Doutorado, 216p.
- Martins-Neto, M.A., Pedrosa-Soares, A.C., Lima, S.A.A. 2001. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco Craton and Araçuaí Fold Belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 141-142: 343-370
- Netto, C., Araújo, M.C., Pinto, C.P., Drumond, J.B.V. 2001. Projeto Leste: Pegmatitos. CPRM-Serviço Geológico do Brasil e Companhia Mineradora de Minas Gerais. Belo Horizonte. Cd-rom



- Noce, C.M., Macambira, M.B., Pedrosa-Soares, A.C. 2000. Chronology of Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí Belt, Eastern Brazil, based on single zircon evaporation dating. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1): 25-29
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M., Pinto, C.P. 2001. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, 110: 307-323
- Pedrosa-Soares, A.C., Wiedemann-Leonardos, C.M. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its Connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. In: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz-Filho, D.A. Campos (ed.), *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, International Geological Congress, p.265-285
- Pinheiro, M.V.B., Basilio, M.S., Krambrock, K., Dantas, M.S.S., Paniago, R., Assunção, A.L., Pedrosa-Soares, A.C. 2000. The cause of color of the blue alexandrites from Malacacheta, Minas Gerais, Brazil. *The Journal of Gemmology*, 27 (3): 161-170
- Pinto, C.P., Pedrosa-Soares, A.C. 2001. Brazilian Gem Provinces. *The Australian Gemmologist*, 21 (1): 12-16
- Pinto, C.P. *et al.* 2001. Projeto Leste: Geologia. CPRM-Serviço Geológico do Brasil e Companhia Mineradora de Minas Gerais. Belo Horizonte. CD-ROM
- Ribeiro-Althoff, A.M., Cheilletz, A., Giuliani, G., Féraud, G., Barbosa-Camacho, G., Zimmermann, J.L. 1997. Evidences of two periods (2 Ga and 650-500 Ma) of emerald formation in Brazil by K-Ar and Ar-Ar dating. *International Geology Review*, 39: 924-937
- Schobbenhaus, C., Queiroz, E.T., Coelho, C.E.S. (ed.) 1991. *Principais Depósitos Minerais do Brasil: Gemas e Rochas Ornamentais*. Brasília, DNPM, 461 p.
- Schwarz, D., Giuliani, G. 2001. Emerald Deposits: A review. *The Australian Gemmologist*, 21 (1): 17-23

capítulo dois

Gemas de Cascalhos e Aluviões

João E. Addad

I n t r o d u ç ã o

Apesar de boa parcela da produção de minerais-gema estar associada a depósitos primários, como pegmatitos graníticos e veios hidrotermais, a produção de algumas delas, como o crisoberilo, coríndon, diamante, andalusita, topázio azul e água-marinha, é decorrente, em parte até quase sua totalidade, de depósitos secundários. A grande maioria desses depósitos está associada a paleoaluvões plio-pleistocênicos, formados sob condições de fluxos torrenciais e retrabalhamento. Os depósitos ocupam atualmente as partes mais profundas dos preenchimentos sedimentares de vales, onde armadilhas de relevo condicionaram sua deposição, ou terraços aluvionares suspensos, relacionados ao desenvolvimento de paleosuperfícies.

O diferencial dessas gemas, dentro de tal contexto secundário, inclui o seu retrabalhamento sedimentar, que fragmenta e 'seleciona' os clastos, e a sua concentração preferencial em níveis e pláceres.

Na última década do século XX, esses depósitos secundários de minerais-gemas têm recebido mais atenção por parte dos pesquisadores (*e.g.* Cassedane *et al.* 1992; Basílio *et al.* 1998; Chodur *et al.* 1998, Karfunkel *et al.* 1998b; Liccardo *et al.* 1998; Perdoncini *et al.* 1998).

A Importância dos Depósitos Secundários

Os depósitos secundários de minerais-gemas, usualmente inconsolidados, mostram uma relativa facilidade mecânica de exploração. Camadas de sedimentos, geralmente cascalheiras aluvionares ou porções rudíticas de colúvios cobrem os níveis mineralizados, e devem ser retiradas. Esse procedimento não oferece maiores dificuldades técnicas, salvo quando se trata de aluviões recentes ou paleoaluviões posicionados sob leitos ativos de cursos de água, quando é necessário o bombeamento da água infiltrada ou o isolamento da porção a ser trabalhada (Figuras 1 e 2). Nessa fase, os minerais-gemas podem ser separados por processos que envolvem classificação granulométrica, lavagem e concentração-catação, em circuitos desenhados na dependência das características específicas do mineral a ser recuperado. No primeiro procedimento, são excluídas as frações de clastos muito acima da faixa de ocorrência do mineral-gema, parâmetro que varia localmente, assim como as frações finas demais para aproveitamento econômico. Gemas de densidade elevada, como o crisoberilo e topázio, podem ser recuperadas em jiques ou outros concentradores, enquanto berilos devem ser, necessariamente, separados por catação manual.

A densidade equivalente ao quartzo também condiciona que minerais como o berilo não sofram concentração em pláceres aluvionares, apresentando uma tendência de distribuição mais homogênea nos níveis mineralizados dos depósitos. Essa tendência se repete em depósitos coluvionares tanto de berilo quanto de topázio, independente da densidade do mineral envolvido. Topázio,



Figura 1. Garimpo de alexandrita e safira da região de Malacacheta. Descida de uma 'cata' (escavação vertical com escoramento lateral por toras e pranchas de madeira, usualmente) até o nível de cascalho mineralizado. (Foto: Antonio Liccardo).



Figura 2. Garimpo de crisoberilo, Esplanada, córrego do Faísca, região de Padre Paraíso, com inundação da 'cata' pelo desligamento das bombas de esgotamento. (Foto: Antonio Liccardo).

crisoberilo e coríndon aluvionares, por outro lado, tendem a ser acumulados em pláceres pela sua densidade, contrastante com as populações predominantes de clastos de quartzo (Tabela 1). Todos esses depósitos apresentam conformações irregulares dos seus volumes mineralizados que são resultado das condições geomorfológicas locais e dos processos de sedimentação.

Observa-se que valores mais extremos podem ser encontrados nos grãos desses minerais devido à presença maciça de inclusões, fraturas vazias ou preenchidas, problemas de cristalização ou alterações.

Durante o transporte, os clastos são expostos a solicitações mecânicas na interação com outros fragmentos. Do ponto de vista do seu aproveitamento gemológico, esse processo determina um selecionamento de porções de um clasto com menor quantidade de defeitos de cristalização, de fraturas e inclusões, que correspondem a partes com maior resistência mecânica a impactos e abrasão. Tal fato significa que, a partir de uma população original de fragmentos, existe uma tendência segundo a qual, após o transporte por uma determinada distância dentro de um fluxo sedimentar, os clastos recuperados apresentam uma maior porcentagem de qualidade gema, pela eliminação de fragmentos mecanicamente mais frágeis. Esse processo mantém uma relação direta com a intensidade e/ou a reincidência de eventos de transporte atuantes, tornando as populações cada vez melhor aproveitáveis economicamente.

Os depósitos secundários ainda apresentam uma outra característica favorável pelo seu modo de ocorrência: além do selecionamento e concentração sedimentares dos clastos-gema, processos intra-estratais de dissolução atuam também como redutores químicos de determinadas fases, concentrando os minerais-gemas não susceptíveis a essa alteração química, como crisoberilo, coríndon, turmalina e diamante.

Grande parte dos depósitos secundários são proximais, o que determina, na maioria das vezes, a ocorrência de uma participação importante de feldspatos como clastos do sedimento. Sob condições úmidas, esses minerais tendem a sofrer caulinição. O retrabalhamento e a erosão desse depósito em um novo ciclo de fluxo intensificado ou pela instalação de uma superfície de entalhe vão encontrar um volume de fração areia-cascalho menor, assim favorecendo a concentração dos clastos-gema.

Os modos de ocorrência dos depósitos secundários de minerais-gemas aliados aos processos de recuperação determinam um

Tabela 1

Minerais-gemas com as respectivas faixas de peso específico, comparados com o quartzo.

Mineral	Peso específico
Quartzo	2,65
Berilo	2,65 - 2,69
Turmalina	3,03 - 3,25
Topázio	3,49 - 3,58
Crisoberilo	3,50 - 3,96
Coríndon	3,98 - 4,02

quadro econômico favorável para minerações pequenas ou artesanais, os garimpos, atividade essencial nas regiões produtoras de gemas em Minas Gerais, envolvendo uma parcela considerável da população menos favorecida economicamente. Mesmo sendo isoladamente pouco relevante, a somatória da produção em garimpos alcança a maior parte da produção de gemas coradas secundárias no Estado.

Os depósitos de natureza secundária mais expressivos em Minas Gerais são água-marinha, crisoberilo e topázio azul, em depósitos aluvionares das regiões de Catugi e Araçuaí; turmalina coluvionar e aluvionar, em diversas áreas do Nordeste de Minas Gerais; coríndon e crisoberilo coluvionar e aluvionar, de Malacacheta; crisoberilo aluvionar, da região de Antônio Dias; coríndon coluvionar e aluvionar, na faixa granulítica Caratinga-Manhuaçu; e, topázio imperial aluvionar, nas proximidades de Ouro Preto. Entre essas gemas, coríndon e crisoberilo são produzidos exclusivamente em depósitos de origem secundária, ao passo que água-marinha, topázio e turmalina secundários apresentam um potencial significativo de participação na produção total de gemas em Minas Gerais.

A Geração dos Depósitos Mineralizados

Dois fatores determinam a gênese dos depósitos secundários: a presença de pegmatitos ou outras rochas portadoras dos minerais-gemas na área de influência do sistema sedimentar envolvido e de condicionantes geomorfológicos favoráveis à deposição, principalmente em armadilhas sedimentares, durante eventos de fluxo intensificado.





O primeiro fator não necessariamente requer uma proximidade ou posição imediata entre a fonte primária e o depósito, apesar de, geralmente, ocorrerem dessa maneira. Depósitos retrabalhados a partir de paleoplácetes, por exemplo, podem condicionar uma elevação de teores, mesmo que o seu novo local de deposição ocorra a distâncias significativas da fonte primária. Desse modo, considerando-se uma determinada população de clastos, a sua distribuição granulométrica vai ocorrer na dependência do retrabalhamento do ambiente sedimentar e da disponibilidade de tamanho na fonte. Deve-se ressaltar que a granulometria é um fator determinante no aproveitamento econômico de um nível mineralizado.

A maior parte dos depósitos secundários de minerais-gemas não mostra relações diretas com as respectivas rochas fontes. Apresentam, entretanto, restrição de ocorrência a porções proximais de microbacias. As variações climáticas e a evolução das superfícies erosivas desmontaram e eliminaram as rochas, alimentando de modo mais expressivo os trechos proximais dos sistemas coluvionares e aluvionares.

As armadilhas de relevo apresentam escalas extremamente locais e podem estar associadas a rupturas de declive, sugerindo controle por falhamentos reativados por regimes neotectônicos ou por processos de erosão diferencial entre as litologias presentes ao longo do sistema.

Os depósitos podem abranger cinco tipologias genéricas: aluviões recentes, paleoaluviões de terraço suspenso, paleoaluviões de fundo de vale, colúvios e elúvios. De um modo simplificado, uma relação seqüencial entre esses tipos pode ser idealizada do seguinte modo: elúvios e colúvios se desenvolveriam sobre a rocha fonte (Figuras 3 e 4); uma primeira superfície peneplanizada seria gerada, sendo responsável pela configuração de chapadas atuais; o rebaixamento do nível de base local em ciclos erosivos posteriores desmontaria essa superfície de modo parcial, formando terraços suspensos, ou de modo mais intenso, configurando vales encaixados estreitos com depósitos de cascalheiras basais; a mudança para um clima mais úmido provocaria o entulhamento dos sistemas por sedimentos arenosos e lamosos e a instalação de cursos fluviais meandantes e suas planícies de inundação (Figura 5), que recobrem e isolam as mineralizações basais.

Cada mineral-gema apresenta regiões potenciais de ocorrência primária, que vão corresponder e se sobrepor às áreas com possibilidade de ocorrências dos respectivos depósitos secundários, além das ocorrências isoladas em termos de contexto geológico. Os minerais gerais encontrados nessas regiões serão descritas na próxima seção.



Figura 3. Depósito eluvionar e coluvionar em uma planície de inundação fluvial, com potencial para água-marinha turmalina, Santa Maria de Itabira. (Foto: Antonio Liccardo).



Figura 4. Depósito coluvionar em exploração para coríndon, Indaiá. (Foto: Antonio Liccardo).

Água-marinha, topázio azul e turmalina

No Nordeste de Minas Gerais, água-marinha, topázio azul e turmalina ocorrem em pegmatitos graníticos da Província Pegmatítica Oriental, em diversos de seus distritos e campos, obedecendo a condicionantes geoquímicos (neste livro, Castañeda *et al.*, Gandini *et al.*). Muitos paleoaluviões, aluviões, *stone-lines*, colúvios e elúvios dessas regiões são portadores de níveis de cascalhos com esses minerais-gemas, como água-marinha e topázio azul-incolor nas bacias dos rios Marambaia e Santa Cruz, na região de Catugi-



Figura 5. Depósito aluvionar no eixo de um vale, com ocorrência de coríndon, Palmeiras, Manhauçu. (Foto: Antonio Liccardo).

Padre Paraíso-Americaninhas-rio Pretinho (Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12); turmalina azul em colúvios da serra entre Linópolis e Divino das Laranjeiras; berilos em aluviões e eluviões de Minas Novas e Novo Cruzeiro; turmalinas aluvionares em Virgem da Lapa e Salinas. Entre as ocorrências secundárias, os paleoaluviões respondem pela maior parte da sua produção, seguidos por aluviões recentes, colúvios e elúvios.

Áreas limítrofes de Minas Gerais, como Jaquetô, Medeiros Neto, no Sul da Bahia, e a bacia do córrego Gambá, afluente do Mutum Preto, em Pancas, no noroeste do Espírito Santo, também apresentam importantes depósitos secundários de água-marinha que obedecem a padrões semelhantes aos depósitos situados em Minas Gerais.

Crisoberilo

Na região entre Catuji, Padre Paraíso e Belo Oriente, dezenas de depósitos secundários aluvionares são portadores de crisoberilo (Proctor, 1988; Cassedane & Roditi, 1993), não havendo, entretanto, produção primária significativa dessa gema.

Possivelmente, os depósitos de crisoberilo secundário mais volumosos de Minas Gerais ocorrem sob os sedimentos do trecho médio do córrego Faísca (Figura 10), um afluente do ribeirão Americana Grande, parte Norte da bacia do alto rio Mucuri. Esses sedimentos incluem sistemas atuais meandrante e paludal associado, sob os quais são encontrados depósitos de cascalheiras nas porções mais profundas do preenchimento sedimentar da calha fluvial, intercalados e sobrepostos por níveis de areias e argilas. As cascalheiras apresentam características que sugerem diversas fases de sedimentação e erosão, em que determinadas fácies apresentam o crisoberilo como mineralização predominante (Figuras 11 e 12), com água-marinha, topázio e andalusita subordinados.



Figura 6. Clasto de água-marinha dos depósitos do rio Marambaia nas proximidades do córrego Pica-Pau, 5cm no maior comprimento. (Foto: Antonio Liccardo).



Figura 7. Clastos de água-marinha dos depósitos secundários do ribeirão Santa Cruz, a Leste de Catugi, maior comprimento de 6cm. (Foto: Antonio Liccardo).

Figura 8. Grânulos de topázio azul dos depósitos de Murundu, rio Marambaia. (Foto: Antonio Liccardo).





Figura 9. Clasto de topázio de azul proximal, ainda apresentando faces cristalinas, depósitos secundários de Murundu, rio Marambaia. Largura máxima de 5cm. (Foto: Antonio Liccardo).

Figura 10. Mapa de localização dos depósitos de Marambaia e Faisca, entre Catugi e Padre Paraíso, Norte de Minas Gerais.

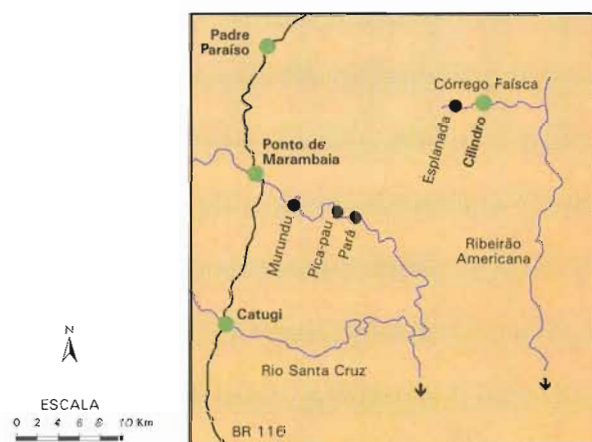




Figura 11. Grânulos de crisoberilo do córrego Faisca, com alto grau de arredondamento. (Foto: Antonio Licardo).



Figura 12. Crisoberilos do Cilindro, trecho proximal do córrego Faisca. Com grãos mais angulosos, indicando menor transporte. Tamanho máximo de 6mm. (Foto: Antonio Licardo).



Coríndon

No trecho entre Caratinga e Manhuaçu, os depósitos secundários de coríndon estão associados a metamorfitos paraderivados de médio a alto grau, biotita gnaisses, granada biotita gnaisses, biotita gnaisses com hiperstênio, migmatitos e charnoquitos (Liccardo & Jordt-Evangelista, neste livro). Nesses depósitos, os níveis mineralizados em safira e rubi correspondem a horizontes em paleocolúvios e paleoaluviões, compostos por seixos e blocos de gnaisses e quartzo, além de matriz argilo-arenosa em diversas proporções. Os paleoaluviões encontram-se recobertos por aluviões atuais, incluindo sistemas paludares (brejos). Em algumas áreas de maior declividade, cursos fluviais atuais retrabalham os paleodepósitos e distribuem o coríndon localmente, como nas microbacias de Indaiá (Liccardo 1999).

Topázio Imperial

O topázio imperial primário ocorre na região de Ouro Preto, em localidades como Vermelhão, Capão do Lana, Trino e Bocaina, dentro de bolsões e veios caulinizados, encaixados como produto de alteração hidrotermal em níveis dolomíticos de litologias do Grupo Piracicaba, Supergrupo Minas (Gandini 1994; César-Mendes *et al.*, neste livro). O nível mineralizado é conhecido localmente como *brown terrena* (Olsen 1971) ou *borra de café*, uma denominação de garimpeiros.

Depósitos secundários de topázio imperial são encontrados em lateritas ferruginosas, colúvios, cascalheiras de terraços aluvionares e de aluviões recentes. Esses depósitos ocorrem ao longo de toda a região mineralizada para topázio imperial e suas adjacências (César-Mendes *et al.* neste livro), como nas imediações a Sudoeste de Trino, nas localidades de Salto, Barraginha e ao longo do curso superior do ribeirão Maracujá. Os clastos de topázio mostram graus variáveis de arredondamento (Figura 13), chegando a padrões muito bem arredondados nos aluviões de Salto (Figura 14), onde são recuperados como um subproduto em garimpos para ouro.



Figura 13. Clastos de topázio imperial do alto curso do ribeirão Maracujá. Diâmetro médio de 1cm. (Foto: Antonio Liccardo).



Figura 14. Grãos de topázio imperial aluvionar do Salto. Comprimento máximo de 1,5cm. (Foto: Antonio Liccardo).

Tipologia dos Depósitos Secundários

O Exemplo de Marambaia

Ponto do Marambaia, no Nordeste de Minas Gerais, é o local mais característico e um dos mais produtivos depósitos para água-marinha e topázio. Esses depósitos apresentaram diversas fases de produção elevada, encontrando-se, atualmente, paralisados na sua maior parte. A exploração desorganizada dificultou a localização de novos trechos de cascalho mineralizado e inviabilizou a continuidade da maioria dos trabalhos. Esse processo de decadência da produção relaciona-se aos condicionantes que determinam o desenvolvimento da atividade garimpeira: intuição prospectiva e empirismo na produção.

Ao longo do vale do rio Marambaia, vários depósitos despontam nas encostas atualmente em produção. O seu intemperismo pretérito e sua erosão forneceram clastos de água-marinha e topázio azul para os depósitos secundários do curso fluvial. Essas gemas podem ser encontradas como seixos desgastados (graus variados de arredondamento e esfericidade), como fragmentos angulosos ou mesmo cristais próximos ao euedrismo, na dependência do seu histórico deposicional. Fendas e fraturas nos clastos geralmente estão preenchidas por argila. Níveis lateritizados e muitos colúvios apresentam um aspecto avermelhado. Nesses depósitos, os grãos e seixos são usualmente cobertos por capas e incrustações de óxidos e hidróxidos de ferro. Nos 'lavados' e concentrados dos cascalhos e colúvios (Figura 15), berilo e topázio são usualmente acompanhados por seixos e grânulos de quartzo fumê, turmalina preta, crisoberilo e andalusita, além de um resíduo pesado de grãos de ilmenita, zircão e monazita na fração arenosa. Clastos de água-marinha de 20 a 30 quilos são reportadas nos aluviões, paleoaluviões e colúvios dessa região.

Ao longo de 8 quilômetros do vale do Marambaia, a partir de Ponto do Marambaia, estão situados os principais depósitos secundários para berilo e topázio azul, nas áreas de Murundu, Pica-Pau e Pará. Em alguns trechos, a calha do vale do rio Marambaia apresenta largura entre 30 e 50m, alcançando de 250 a 400m em porções mais abertas. Os 'serviços' se distribuem numa tentativa de alcançar os níveis e lentes de paleocascalho mineralizado, posicionados entre porções estéreis (Figura 16). Usualmente, os níveis são



encontrados a profundidades que variam entre 3 e 6m abaixo da superfície de inundação do curso atual do rio, apresentando espessuras da ordem de 1 a 2m, continuidades laterais entre 5 e 15m, e terminações em acunhamentos ou transições para fácies arenosas.

Seqüências condicionadas por eventos erosivos/deposicionais possibilitaram um empilhamento com características próprias para cada depósito, com variações internas potencialmente grandes entre as fácies cascalhosas, arenosas e pelíticas, produtos da movimentação do leito fluvial entre as encostas do vale, depositando e recortando seus próprios sedimentos durante estágios sucessivos de fluxo mais e menos intenso. Isso resulta que esse empilhamento sedimentar pode variar em distâncias muito curtas, dentro de um mesmo depósito. Tentativas de se estabelecerem correlações estratigráficas são dificultadas devido a essa característica. Entretanto, muitos dos depósitos mostram o nível mais basal como o preferencialmente mineralizado, do mesmo modo que a grande maioria dos depósitos de outras gemas. Tais níveis mineralizados correspondem a períodos específicos de entrada de clastos de minerais-gemas no sistema por influência do regime de fluxo ou da exposição de porções mineralizadas da rocha fonte.

Não existem dados de correlação entre os teores de berilos e topázios nos níveis dos depósitos, assim como para variações de teores ao longo dos trechos do vale do rio Marambaia. Garimpeiros reportam volumes recuperados da ordem de 0,20 a 0,25 l/m³ de minerais-gema nos níveis mais enriquecidos. Em tal volume, são considerados grãos sem aproveitamento econômico e grãos de qualidade gema, em proporções extremamente variáveis. Eventuais clastos de água-marinha da ordem de 1 a 5 kg são também reportados.

Atualmente ocorrem pequenos focos de produção secundária por garimpagem em 'catas'. A abertura manual dos poços até o nível de paleocascalho mineralizado é seguida do emprego de peneiras e surucas (seqüência de peneiras, eventualmente confeccionadas com chapas metálicas perfuradas manualmente) ou de conjuntos de resumidores e dragas, de complexidade técnica muito variável.

Alteração de Fluxo Sedimentar por Controle Paleoclimático e o Condicionamento dos Depósitos

Durante o Quaternário, ocorreram flutuações climáticas que causaram mudanças nas características e intensidade dos processos de denudação, produzindo sedimentos e morfologias distintos dos atuais. Os ciclos glaciais do Pleistoceno caracterizaram-se por paleoclimas mais frios e secos, evidenciados por depósitos típicos de clima semi-árido, colúvios e aluviões produzidos por chuvas torrenciais episódicas sobre uma superfície coberta por vegetação esparsa (Clapperton 1993). Desse modo, as rochas portadoras de minerais-gemas seriam desmontadas, fornecendo clastos para os paleossistemas sedimentares. Nesse cenário, os períodos úmidos correspondem a processos de intemperismo químico mais intenso, ao passo que os mais secos, à desagregação mecânica.

Amaral *et al.* (1997) analisaram por traço de fissão a história térmica de apatitas de áreas do Brasil Central e Sudeste, encontrando uma tendência geral de resfriamento a partir de 60 Ma, de ~80°C a ~25°C, que indica um soerguimento generalizado e denudação progressiva dessa porção do continente.

No Plioceno, os efeitos de movimentação tectônica provocaram arqueamentos e a fragmentação da chamada superfície Sul-americana, por meio do posicionamento diferencial de blocos (Saadi 1991). Durante o Plioceno e o Pleistoceno Inferior, são desenvolvidos depósitos que atualmente ocupam altos de chapadas e os complexos de rampa. No Pleistoceno Médio a Superior, depositam-se os terraços fluviais de cota entre 4 e 10 metros, terraços diretamente relacionados às calhas atuais, enquanto que o Holoceno, corresponde à formação das planícies aluvionares recentes (Saadi 1991).

As mudanças climáticas e a atividade geomorfológica do Pleistoceno mostram evidências de variação regional em termos de intensidade e produtos (Salgado-Labouriau 1997). Os ciclos glaciais do Pleistoceno caracterizaram-se por paleoclimas mais frios e secos, evidenciados por depósitos típicos de clima semi-árido, colúvios produzidos por chuvas torrenciais episódicas sobre uma superfície coberta por vegetação esparsa de gramíneas (o processo de *colluviation*, Clapperton 1993), e pela falta de restos orgânicos



Figura15. 'Cata' na região de Ponto do Marambaia Minas Gerais, visando encontrar mineral-gema. (Foto: Antonio Liccardo).

(macrofósseis vegetais). Turcq *et al.* (1996), por meio de uma abordagem geomorfológica aliada à datação radiocarbono, indicam um período seco centrado em torno de 20-22000 anos atrás. Posteriormente, a transição Pleistoceno/Holoceno na região Atlântica, definida entre a Serra do Espinhaço e a Serra do Mar, é marcada por diversos eventos coluviais relacionados a flutuações paleoclimáticas mais úmidas, instaladas a partir de 17-13000 anos passados.

O fim do Pleistoceno e o início do Holoceno são caracterizados, de um modo genérico, por uma alteração na magnitude dos fluxos de sedimentos devido às mudanças nos regimes hídricos, em função de maiores índices pluviométricos. O término da última

Figura 16. Níveis arenosos com estratificações cruzadas marcados pela presença de minerais pesados, Murundu, região de Ponto do Marambaia, Minas Gerais. (Foto: João Addad).





glaciação pleistocênica disponibilizou grande quantidade de água, antes presa nas geleiras para os ciclos hídricos do planeta, tanto na forma da ação direta da água do degelo, no hemisfério Norte, principalmente, quando da passagem de um paleoclima árido para condições mais úmidas, processo dominante no hemisfério Sul (Frakes 1979; Clapperton 1993).

Mello *et al.* (1998) caracterizaram estratigraficamente os depósitos sedimentares da região do rio Doce (MG), individualizados por discordâncias erosivas, delimitando depósitos fluviais torrenciais - fluxos de detritos no Pleistoceno e depósitos aluvionares- coluvionares, relacionados a um importante evento de geração de leques aluviais e de canais de baixa sinuosidade na primeira metade do Holoceno.

Durante a estabilização climática alcançada no Holoceno, ocorre a diminuição generalizada da intensidade dos fluxos e os depósitos são, então, preservados e isolados por processos de entulhamento dos sistemas fluviais. Meis (1977, 1978) considera relacionados a variações climáticas de menor intensidade os processos de degradação das rampas neopleistocênicas, que diminuem seu gradiente e favorecem a instalação de sistemas meandantes associados ao Holoceno, e a formação de terraços fluviais em diversos níveis. Suguio *et al.* (1993) descrevem episódios erosivos, a partir de 7000 anos atrás, episódios que sugerem a instalação de flutuações de curta duração em um paleoclima úmido. O entulhamento sedimentar resulta, por exemplo, no fato de os cursos d'água atuais ocuparem posições intermediárias nos vales, comparativamente aos cursos atuantes no paleoalveio que entalhou inicialmente a morfologia do vale. No cenário pretérito, a paleocalha estaria lateralmente mais restrita pela menor largura do talvegue encaixado diretamente sobre a rocha/regolito.

Perspectivas aloestratigráficas ou morfoestratigráficas de elementos como migrações abruptas de cursos fluviais, deposição de leques aluviais, pulsos de produção de sedimentos, entalhe e reentalhe de terraços, deposição sobre coureiras ferruginosas, lateritas de lençol ou sobre paleossolos, tanto por controle paleoclimático (principalmente chuvas torrenciais na passagem Pleistoceno/Holoceno e em fases iniciais do Holoceno) quanto por controle neotectônico, resultaram em cenários evolutivos mais claros dos depósitos cenozóicos (por exemplo, na bacia do Rio Doce (Mello *et al.* 1998); no Alto São Francisco (Borges de Campos 1998); na bacia do Rio Grande (Santos *et al.* 1998).

Apesar de ainda não estarem disponíveis dados geocronológicos relativos aos depósitos secundários de minerais-gemas de Minas Gerais, pode-se considerar como plio-pleistocênicos a geração de grande parte desses depósitos, em função da associação entre eventos de fluxo intensificado e períodos de aridez. Cassedane *et al.* (1992), por exemplo, associam um período relativamente mais árido centrado em 40000 anos atrás para a deposição das cascalheiras portadoras de água-marinha do Nordeste de Minas Gerais.

A consideração de parâmetros de retrabalhamento, relacionados com os episódios climáticos/sedimentares permite, por intermédio de uma amostragem contextualizada estratigraficamente, a diferenciação relativa de níveis e subníveis, mesmo que o posicionamento absoluto e a datação das unidades não façam parte dos procedimentos adotados ou possíveis de serem implementados.

A Caracterização dos Depósitos Secundários e sua Prospecção

Muitos depósitos secundários de seqüências coluvionares ou aluvionares adjacentes/sobrejacentes se apresentam semelhantes em escala de afloramento, podendo, entretanto, apresentar um histórico geológico diferenciado, sendo necessário um levantamento detalhado para sua discriminação. Nos locais em que as ferramentas morfológicas são pouco claras, características texturais, como análise de forma dos seixos e a granulometria (considerando-se características herdadas por ressedimentação versus as características reflexas do processo de transporte e deposição (Gale & Hoare 1991), além de características composicionais, principalmente de minerais pesados presentes no sedimento, são bases para uma abordagem mais detalhada, permitindo a identificação, por exemplo, de uma cascalheira fluvial basal que tenha sofrido incisão e preenchimento parcial por cascalhos mais recentes.



As quantidades relativas de minerais pesados em um determinado sedimento dependem da abundância de cada um deles na área fonte e de fatores relacionados aos processos de transporte, que incluem a capacidade de sobrevivência ao intemperismo e a segregação devido à diferenças na densidade. Com isso, esses grãos formam assembléias extremamente específicas na composição mineral, distribuídas ao longo do sistema deposicional envolvido. Por meio da determinação dessas assembléias, as fontes, os caminhos ou mesmo as seqüências deposicionais de um depósito podem ser traçadas.

Clivagens fragmentam os grãos rapidamente, abrindo caminho para alterações químicas e fazendo com que desapareçam à medida que se processa o seu transporte. Existem, entretanto, diferenças nas estabilidades relativas de minerais em diferentes ambientes intempéricos/diagenéticos. Um controle básico, oriundo tanto de variações no clima e cobertura vegetal, como, principalmente, na composição do material por onde circulam essas águas, é dado pelas variações no quimismo das águas subterrâneas. Em areias ou arenitos porosos, a água subterrânea circula livremente, mantendo os minerais instáveis em desequilíbrio até o seu desaparecimento. Em solos, entretanto, a circulação da água pode ser restrita, além de ocorrerem freqüentes períodos de estagnação. Desse modo, reações em solos são consideravelmente complexas e variáveis, passando os minerais por longos períodos de metaestabilidade, seguidos por fulminantes episódios de dissolução de fases minerais detríticas. Essa mudança ocorre de maneira mais rápida próximo à superfície do solo, onde águas de chuva, usualmente menos saturadas nos constituintes dissolvidos, atuam. Em muitos lugares, a pedogênese tem uma continuidade por longos períodos de tempo, entretanto, a maioria dos solos pode ser considerada como feições efêmeras em termos geológicos. Processos como a alteração do nível de base de uma bacia fluvial, mudanças climáticas ou eventos catastróficos, interrompem a ação das soluções e redistribuem os grãos (Haughton *et al.* 1991).

O modo mais usual de prospecção para depósitos de paleocascalheiras soterradas em fundos de vales, considerando que aluviões, colúvios e terraços podem ser facilmente amostrados e avaliados através de trincheiras ou coleta direta de material, é o método do 'ferro'. Um vergalhão de 3/4 de polegada de diâmetro, com 3 a 5 metros de comprimento, é posicionado perpendicularmente à superfície de um depósito fluvial, uma planície de inundação ou brejo. O próprio peso do vergalhão o insere parcialmente no depósito, o que é facilitado por uma ponta afinada. Com auxílio de uma marreta e de uma escada, ou um tablado montado no local, o 'ferro' é 'batido' na sua extremidade superior até que penetre na profundidade desejada. Ao encontrar um nível de cascalho, ocorre uma mudança na sua taxa de penetração ou mesmo uma interrupção na sua descida, perceptível pelo operador. Procede-se, então, à abertura de uma 'cata' para amostragem e avaliação do cascalho encontrado.

Uma Alternativa para o Esgotamento da Produção Primária

As coberturas sedimentares apresentam potencial para depósitos secundários de minerais pesados, por exemplo, cassiterita e monazita, assim como de gemas coradas e diamantes. A tradicional procura por 'serviços de chapada', constituídos de pegmatitos e veios, eventualmente deixa para trás depósitos secundários com potencial de produção para água-marinha, topázio, turmalina e crisoberilo. A sua presença limitada no cascalho, em grande parte das vezes subsuperficiais e isolados das drenagens atuais, requer uma prospecção direcionada como meio de determinar sua presença.

Procedimentos inadequados de exploração de depósitos primários, os pegmatitos e veios, assim como as dificuldades de localização e exploração de novos corpos mineralizados, tornam os depósitos secundários de áreas de conhecida produção de gemas, uma alternativa para recuperação e aumento desta produção. Cenários como Marambaia, no qual, ao longo de um sistema fluvial, numerosos pegmatitos são erodidos e contribuem para os depósitos secundários, estabelecem parâmetros para outras situações semelhantes.

Bibliografia Consultada

- Amaral, G., Born, H., Hadler, J.C., Iunes, P.J., Kawashita, K., Machado, D.L., Oliveira, E.P., Paulo, S.R., Tello, C.A. 1997. *Fission track analysis of apatites from São Francisco craton and Mesozoic alkaline-carbonatite complexes from central and southeastern Brazil*. *Journal of South American Earth Sciences*, 10(3-4): 285-294.
- Basilio, M.S.; Pinheiro, M.V.B.; Jordt-Evangelista, H.; Pedrosa-Soares, A.C.; Assunção, A.L.; Guedes, K.J.; Krambrock, K.; Dantas, M.S.S. 1998. Aspectos gemológicos das alexandritas de Malacacheta, MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 267.
- Borges de Campos, A. 1998. Níveis de terraços e tectônica recente no curso fluvial do Rio Candonga - zona do Alto São Francisco - Arcos, MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 85.
- Cassedane, J.; Roditi, M. 1993. *The location, geology, mineralogy and gem deposits of alexandrite, cat's-eye and chrysoberyl in Brazil*. *Journal of Gemology*, 23: 333-355.
- Cassedane, J.P.; Alves, J.N.; Cassedane, J.O. 1992. *Gisements alluvionnaires brésiliens d'aigue-marine*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 64(1): 43-62.
- Chodur, N.L., Svisero, D.P., Vlach, S.R.F. 1998. Mineralogia e quimismo do coríndon da região de Barra Velha, Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 287.
- Clapperton, C. 1993. *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Amsterdam, Elsevier, 779p.
- Frakes, L.A. 1979. *Climates Throughout Geologic Time*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company, 310p.
- Gale, S.J.; Hoare, P.G. 1991. *Quaternary Sediments - Petrographic Methods for the Study of Unlithified Rocks*. London, Belhaven Press, 323p.
- Gandini, A.L. 1994. Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais. USP, Instituto de Geociências, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 212p.
- Haughton, P.D.W.; Todd, S.P.; Morton, A.C. 1991. *Sedimentary provenance studies*. In: Morton, A.C., Todd, S.P., Haughton, P.D.W. (eds.) *Developments in Sedimentary Provenance Studies*, Geological Society. 57: 1-11.
- Karfunkel, J.; Chaves, M.L.S.C.; Banko, A.G.; Hoover, D.B. 1998b. *Colluvial diamond and quartz deposits from the Espinhaço Range (MG): genesis and economic importance*. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 272.
- Liccardo, A. 1999. Safiras de Indaiá, MG, mineralogia, geologia e gemologia., UFOP, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 126p.
- Liccardo, A., Jordt Evangelista, H., Addad, J. 1998. Caracterização mineralógica da safira de Indaiá, Minas Gerais, e gênese de seus depósitos coluvionares e aluvionares. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 269.
- Meis, M.R.M. 1977. As unidades morfoestratigráficas neoquaternárias do médio vale do rio Doce. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 49(3): 443-459.
- Meis, M.R.M. 1978. Estratigrafia preliminar para a sequência de colmatagem dos lagos neoquaternários do médio vale do rio Doce. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 50(1):125-126.
- Mello, C.L.; Suguio, K.; Kohler, H.C. 1998. Aloestratigrafia dos depósitos cenozóicos do médio vale do Rio Doce (MG). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais, 70.
- Olsen, 1971. *Origin of topaz deposits near Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil*. *Economic Geology*, 66: 627-631.
- Perdoncini, L.C., Zanardo, A., Carvalho, S.G., Morales, N., Claro, C. 1998. Dcorrências de rubi associadas aos pláceres diamantíferos da região de Franca (SP), na Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Belo Horizonte, Anais..., 292.
- Proctor, K. 1988. *Chrysoberyl and alexandrite from the pegmatite districts of Minas Gerais, Brazil*. *Gems and Gemology*, 24: 16-32.
- Saadi, A. 1991. Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais. UFMG, IGC, Departamento de Geografia, Belo Horizonte, Tese de Professor Titular, 285p.
- Salgado Labouriau, M.L. 1997. As mudanças na vegetação do Brasil central nos últimos 36 mil anos. Revista da Universidade de Guarulhos, Geociências:200-201.
- Santos, M.; Hasui, Y.; Costa, J.B.S.; Borges, M.S.; Rueda, J.J.; Morales, N.; Ladeira, F.S.B. 1998. Depósitos neocenozóicos na região de Minduri, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40, SBG, Anais, Belo Horizonte, 75 p.
- Suguio, K.; Absy, M.L.; Flexor, J.M.; Ledru, M.P.; Martin, L.; Sifeddine, A.; Soubiès, F.; Turcq, B.; Ybert, J.-P. 1993. *The evolution of the continental and coastal environments during the last climatic cycle in Brazil (120k.y. B.P. to present)*. Boletim IG-USP, Série Científica, Instituto de Geociências, 24: 27-41.
- Turcq, B.; Albuquerque, A.L.S.; Ledru, M.P.; Mello, C.L.; Pressinotti, M.M.N.; Riccomini, C.; Suguio, K. 1996. A transição Pleistoceno-Holoceno na região sudeste brasileira. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 39, SBG, Anais..., Salvador, 4: 507-509.



capítulo três



Tratamento em Gemas

Maurício Favacho
Antonio Liccardo
Cristiane Castañeda

I n t r o d u ç ã o

Grande parte das gemas, quando extraída da natureza, não exhibe a cor intensa observada em joalherias. Algumas são resultados diretos de tratamentos que influenciam suas cores originais. As principais razões para que uma gema seja submetida a algum tipo de tratamento são:

Beleza: O tratamento de uma gema pode alterar de modo significativo a sua aparência. A modificação pode transformar uma gema inicialmente incolor, ou levemente colorida, em uma de cor mais intensa.

Moda: Os consumidores parecem sempre querer algo novo. Gemas tratadas podem ser produzidas em quantidade e em diferentes cores que não estão disponíveis na natureza.

Preço: Os tratamentos aumentam a produção e, com isso, a disponibilidade no mercado. Desse modo, gemas de preço elevado podem ter seus preços diminuídos se existirem grandes quantidades de seu correspondente tratado. No entanto, o controle da quantidade do material tratado deve ser realizado por órgão competente para que tal material não inunde o comércio e a gema torne-se banal.

Demanda: A demanda por gemas naturalmente coloridas sempre excede o limite do suprimento existente nos depósitos. Com os tratamentos, aumenta-se a disponibilidade de certos materiais gemológicos tidos como de baixa demanda, melhorando os segmentos de importação e exportação do comércio de gemas.

Os tipos mais comuns de tratamentos aplicados em gemas e que serão abordados são: tratamento térmico, irradiação, difusão e preenchimento de fraturas. Esse último, será tratado no próximo capítulo.

O tratamento térmico é amplamente aceito e usado em gemas como rubis, safiras, âmbar, água-marinha, ametista, citrino, tanzanita, zircão, topázio, e turmalina no que se refere ao melhoramento da transparência e/ou a cor da gema. Grandes quantidades de coríndon têm sido tratadas termicamente para melhorar a cor; variedades escuras de turmalinas são, freqüentemente, aquecidas para clarear a cor original; água-marinha verde é aquecida para se transformar na sua variedade azul, comercialmente mais viável; e assim por diante. As técnicas de tratamento térmico variam de simples aquecimentos de gemas em tubos de ensaio até aquecimento em sofisticados fornos elétricos ou a gás com controle de temperatura, pressão e atmosfera. Desde que a cor seja permanente, gemas tratadas por aquecimento não necessitam de cuidados especiais.



Gemas podem mudar de cor se expostas à radiação. A radiação pode vir de elementos radioativos existentes nos depósitos, como tório e potássio ou de fontes artificiais existente nos laboratórios. A radiação natural pode levar milhões de anos para afetar a cor de uma gema, enquanto a irradiação artificial pode levar apenas algumas horas. Em alguns casos, a gema apresenta baixa estabilidade em sua cor e pode desbotar em presença da luz solar. Nesses casos, em se tratando de gemas irradiadas, a estabilidade de cor em termos de temperatura deve sempre ser mencionada. O topázio azul é um bom exemplo de gema irradiada com excelente estabilidade de cor que, quando irradiado adquire uma coloração marrom e, quando aquecido a uma temperatura adequada, o azul é produzido. Gemas irradiadas que apresentam alta estabilidade de cor não precisam de cuidados especiais.

O tratamento termoquímico, ou simplesmente, difusão, é a combinação do uso de altas temperaturas e diferentes tipos de óxidos, que podem difundir e originar uma fina película nas porções superficiais da gemas. É um método usado, principalmente, em safiras e topázios. Apesar de grande estabilidade de cor apresentada pela gema após tratamento, esse processo não é muito aceito no comércio.

O termo "inaceitável" se aplica quando o comércio decide que o método de tratamento e seus produtos não merecem um lugar no mercado. Grande parte dos tratamentos inaceitáveis alteram a estrutura cristalina do mineral e não apresentam similares na natureza. Desse modo "aceitável" são os tratamentos que melhoram a aparência e durabilidade de uma gema sem alterar sua composição química original. Devido a essa característica, alguns tratamentos são praticamente impossíveis de serem identificados.

Outros Tipos de Tratamentos

- 1- Clareamento: uso de produtos químicos ou outros agentes para clarear ou remover cores indesejadas.
- 2- Tingimento: introdução de corantes para intensificação, uniformização ou mesmo modificação das cores.
- 3- Aplicação de *laser*: uso de *laser* e produtos químicos para a retirada de inclusões indesejadas, principalmente dentro de diamantes.
- 4- Impregnação: introdução de óleos incolores, cera, resina natural, ou produtos sintéticos em gemas fissuradas ou porosas para o melhoramento da cor e/ou transparência.
- 5- HPHT (*High Pressure e High Temperature*): Tratamento que envolve alta pressão e altas temperaturas para remoção dos centros de cor em diamantes.



Foto 1. Quartzo tratado por irradiação Gama que usa como fonte o Cobalto-60. Essas variedades são provenientes de material completamente incolor e após tratamento são conhecidas no comércio como *beer* (amarelo) e *whiskey* (laranja-amarronzado). (Foto: Maurício Favacho).



Tratamento Térmico

O tratamento térmico consiste em provocar alterações em uma gema por meio da aplicação do calor sob condições adequadas. Os principais objetivos de um tratamento térmico são: melhoramento, uniformização, mudança e adição de cor, desenvolvimento ou eliminação de asterismo, e melhoramento da transparência por dissolução de inclusões. Pode-se atingir esses objetivos por meio da determinação de parâmetros, tais como a temperatura máxima a ser atingida, o tempo de duração em que a temperatura máxima é mantida, a taxa de aquecimento e resfriamento da temperatura do forno, a natureza química e a pressão da atmosfera, assim como a natureza do material em contato com a gema. Todos esses fatores podem variar durante o tratamento e vão determinar as mudanças desejadas para cada tipo de gema.

Principais Gemas Tratadas Termicamente

Coríndon

Rubis e safiras começaram a escassear a partir de 1940, quando a região de Mogok, na antiga Birmânia, fechou suas 'portas' para o mundo ocidental. Essa escassez serviu de estímulo para os experimentos de melhoramento de cor e transparência do coríndon procedente de outras localidades, com qualidade inferior. Alguns resultados obtidos foram tão espetaculares que transformaram material pouco atrativo em gemas comercialmente viáveis.

O tratamento térmico em coríndon abrange uma série de possibilidades de alteração das características visuais desse mineral. Além de mudança na coloração da gema, a transparência pode ser melhorada assim como ressaltar, ou mesmo criar, efeitos ópticos especiais como asterismo ou efeito de mudança de cor (efeito alexandrita).

A coloração em coríndon é dada por elementos cromóforos presentes na forma de impurezas em quantidades, concentrações e proporções diversas. Os principais elementos que podem participar na origem da coloração em coríndon são Cr, Fe, Ti, V e Mn. Entretanto, raramente eles estão presentes com a dosagem e homogeneidade necessárias para produzir as colorações dos rubis e safiras mais finos. Uma configuração desbalanceada desses elementos resulta numa cor menos desejável. Por exemplo, quantidades excessivas de ferro e titânio em safiras azuis resultam numa aparência muito escura. Por outro lado, quantidades insuficientes desses elementos resultam em gemas de coloração muito clara. Outras vezes cromóforos, atuando como modificadores de cor, podem estar presentes no coríndon e gerar uma cor indeterminada ou, ainda, encobrir a cor principal, ocasionando cores secundárias e manchas. Existem algumas situações em que os elementos cromóforos estão presentes, com potencial para gerar coloração, mas ainda não foram ativados pelo desenvolvimento normal do cristal. Esses e outros são motivos que podem levar ao tratamento térmico da gema, quando se busca melhorar a qualidade do material. Hughes (1990) cita o exemplo de safira com densas concentrações de agulhas de rutilo aquecidas entre 1500° e 1900°C em atmosfera redutora, na qual o calor propicia a fusão do rutilo e conduz o titânio dentro da solução sólida, enquanto a atmosfera redutora converte o ferro presente do estado férrico ao ferroso. O resfriamento rápido faz com que o titânio não volte a formar rutilo. Nesse ponto, Fe²⁺ e Ti⁴⁺ necessários para causar a cor azul estão presentes e a coloração clara passa a um azul profundo.

Muitas safiras possuem as 'impurezas' necessárias para ter uma cor azul profundo, mas não no estado adequado para causar coloração, assim elas possuem pouca ou nenhuma cor. O tratamento térmico pode retificar essa situação (alterando o estado de valência dessas 'impurezas') e trazer à tona a coloração azul que estaria como que num estado latente. Esse processo é usado nas safiras geuda do Sri Lanka, denominação surgida no final da década de 60 do século passado no mercado da Tailândia, referindo-se a

espécimes de coríndon com aspecto leitoso e sedoso com baixa qualidade em cor e transparência. A utilização de tratamento térmico adequado transformou as safiras geuda em gemas de um azul intenso com alto valor comercial (Themelis 1992). Segundo Hughes (1990), atualmente as gemas tratadas por aquecimento constituem mais regra do que exceção. De 1980 a 1990, entre os rubis e safiras produzidos pelos tradicionais fornecedores da Ásia, 95% das gemas exportadas foram tratadas termicamente.

O tratamento térmico em coríndon pode ser dividido em cinco processos básicos: remoção da seda; desenvolvimento da seda; desenvolvimento da cor azul; remoção da cor azul e desenvolvimento da cor amarela. Themelis (1992) apresenta um estudo mais específico, definindo quatorze processos conhecidos em tratamento térmico para rubis e safiras de várias localidades:

- Processo 1 - Diminuição de tons azuis, violeta e marrom em rubi e safira rosa.
- Processo 2 - Diminuição de manchas azuladas em rubi.
- Processo 3 - Desenvolvimento do laranja em safira amarela.
- Processo 4 - Desenvolvimento do rosa em safira laranja.
- Processo 5 - Intensificação do amarelo e desenvolvimento do laranja em safira amarela e laranja.
- Processo 6 - Desenvolvimento da cor azul.
- Processo 7 - Clareamento de azul muito escuro.
- Processo 8 - Escurecimento de azul muito claro.
- Processo 9 - Desenvolvimento do lilás, púrpura e efeito alexandrita.
- Processo 10 - Diminuição de zonamentos de cor azul ou manchas amarelas.
- Processo 11 - Desenvolvimento de asterismo e efeito seda.
- Processo 12 - Remoção de asterismo ou efeito seda.
- Processo 13 - Desenvolvimento de azul a partir de safira cinza com asterismo.
- Processo 14 - Difusão de aditivos em rubi e safiras para mudança de coloração.

Tabela 1 Os primeiros tratamentos térmicos nos minerais do grupo da turmalina.

Cor original	Temperatura	Efeito	Cor obtida	Referência
Azul esverdeado	500 - 750°C	Clareamento	Azul clara	Nassau 1984
Verde	800°C (meio oxidante)	Troca de cor	Castanho avermelhado	Nassau 1984
Verde	800°C (meio redutor)	Troca de cor	Azul	Nassau 1984
Verde escura	300 - 400°C	Clareamento	Verde esmeralda	Sinkankas 1981
Vermelha	280°C 370°C 500°C	Clareamento Descoloramento Troca de cor	Vermelha acastanhada - Verde leitosa	Fonseca 1989
Vermelha	550 - 600°C	Clareamento	Rosa	Fonseca 1989
Rosa	400°C	Descoloramento	Rosa muito claro	Bershov <i>et al.</i> 1969



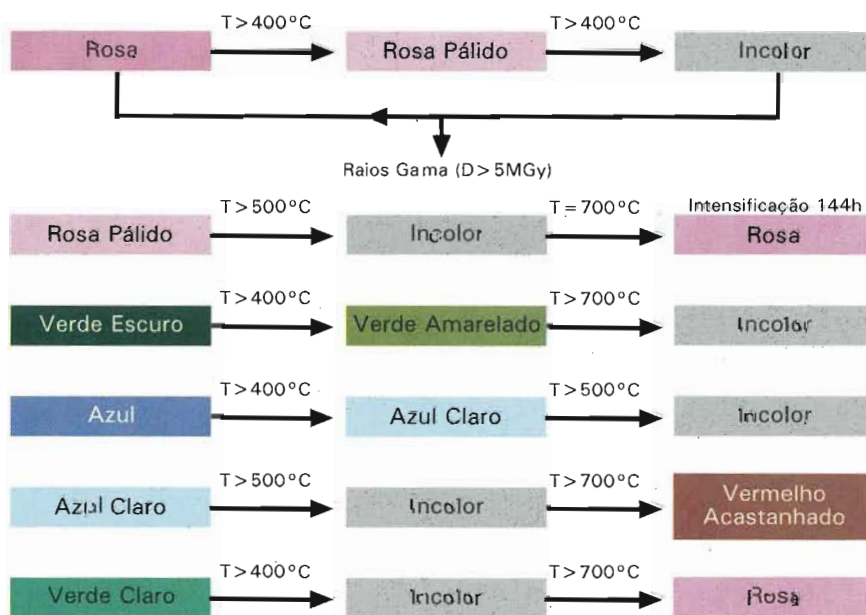


Além do muitos depósitos mundialmente conhecidos, nos últimos anos têm sido relatadas novas e promissoras ocorrências de coríndon em todo o Brasil (ver Capítulo Coríndon). Assim, torna-se de grande importância o estudo do tratamento térmico em coríndon, à medida que existe um grande potencial, não só para melhoramento dessas gemas, mas também de viabilização da produção sistemática nessas ocorrências.

T u r m a l i n a

A maioria dos tratamentos térmicos utilizados em turmalinas considera somente a temperatura, apesar da necessidade de se levar em conta parâmetros como a atmosfera do meio e o tempo de duração do processo. Os primeiros ensaios foram realizados no início do século XIX e, desde então, alguns pesquisadores forneceram dados experimentais com os mais variados resultados os quais mostraram que a maioria das turmalinas, quando submetidas ao aquecimento, apresenta-se mais clara após o tratamento. A Tabela 1 mostra alguns exemplos de tratamento térmico que não considera as composições químicas específicas. Atualmente, informações mais detalhadas são obtidas, tanto sobre os elementos químicos presentes (pois a cada nova ocorrência surgem novos cromóforos), quanto através de pesquisas em fornos sofisticados, nos quais existe maior controle de temperatura, atmosfera e rampas de aquecimento e resfriamento.

Turmalinas da série elbaíta-schorlita, provenientes de pegmatitos complexos do Distrito de Araçuaí, Minas Gerais, mostraram diferentes resultados quando tratadas termicamente em forno elétrico. O processo consistiu dos seguintes parâmetros: atmosfera oxidante, intervalos de tempo de duração na temperatura máxima de 12, 24, 48, 72 e 144 h, rampa de aquecimento de 10° por segundo e de resfriamento lento a partir do desligamento do forno. As amostras, colocadas em cadinho vazio ou envoltas por óxidos, tiveram como principais parâmetros controladores das mudanças o tempo de duração na temperatura máxima e o óxido utilizado como meio. A temperatura máxima atingida não ultrapassou 750°C , a partir desse limite, ocorre fraturamento e conseqüente aumento do aspecto leitoso das amostras. A mudança de fase dos minerais da série elbaíta-schorlita ocorre a partir de 800°C com a transformação para mulita. As principais mudanças observadas estão resumidas no esquema a seguir:



Berilo

O tratamento térmico é capaz de promover mudanças tanto na cor como na tonalidade do berilo, dependendo do tipo de impureza. O rosa pode ser removido à temperaturas de 500°C; o vermelho é estável até 1000°C. Esses exemplos podem ter suas temperaturas rebaixadas ou mesmo ter o efeito invertido, se alguma outra impureza, como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Li^+ ou Mn^{3+} , estiver presente. O aquecimento pode produzir a mudança do heliodoro para o berilo incolor, assim como intensificar e/ou tirar nuanças de verde da água-marinha (Nassau 1994). Todas essas mudanças de cor por aquecimento são estáveis sob a luz solar e podem ser revertidas por irradiação.

Alguns cuidados devem ser tomados durante o tratamento térmico no berilo para que não ocorra o fraturamento não desejado. As temperaturas utilizadas durante o tratamento dependem dos objetivos a serem atingidos e da natureza do cristal. Dessa maneira, uma caracterização física, química e microestrutural deve ser feita antes de se iniciar o tratamento. Temperaturas entre 250 e 500°C são convenientes para essa gema, se submetida a cerca de uma hora em temperatura baixa e poucos minutos em alta. Temperaturas de até 400°C são mais seguras. Condições redutoras são freqüentemente usadas, mas normalmente não são necessárias. Pequenas inclusões podem, muitas vezes, ser removidas por aquecimento (Nassau 1994). O aquecimento também tem sido usado para produzir fraturas no berilo, como é feito no quartzo, para subsequente tingimento (Brown & Snow 1985). Os resultados mais comuns do tratamento térmico do berilo, sintetizados por Nassau são: remoção do amarelo; remoção do rosa (morganita); remoção do azul Maxixe; e remoção do preto, enfumaçado ou violeta.

O tratamento térmico de berilo que tem se tornado importante no mercado internacional é o do berilo azul esverdeado que se transforma em água-marinha, da qual o Brasil é um dos maiores produtores mundiais. Mais de 90% da água-marinha, de qualidade gemológica, comercializada no mercado internacional, é tratada termicamente (Sabioni & Ferreira 1996).

Quartzo

A importância dos tratamentos térmicos em quartzo reside basicamente em:

- 1- filtragem de tons fumê em ametistas naturais ou irradiadas;
- 2- filtragem de tons fumê em citrinos naturais ou irradiados;

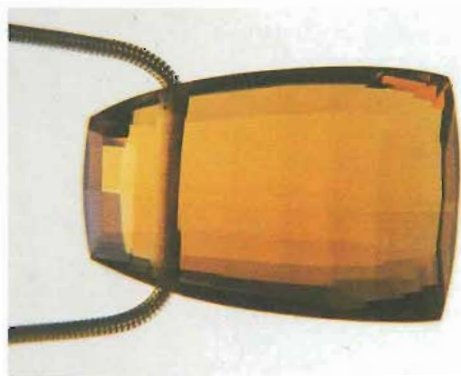


Foto 2. Variedade de quartzo tratada por Cobalto-60 (irradiação Gama) conhecida no comércio como *cognac*. (Foto: Maurício Favacho).





- 3- transformação do citrino laranja-amarronzado, *Whiskey*, para o completamente laranja, conhaque;
- 4- filtragem do fumê para o aparecimento do *Green-gold* e *Olive*;
- 5- transformação de ametistas naturais em citrinos (Rio Grande do Sul e Pará);
- 6- transformação de ametistas em quartzo verde (prasiolita) - Ex. Montezuma, MG.

Sob o ponto de vista científico, cristais hialinos, também são de grande importância. Assim sendo, estudar o desbotamento de quartzo originalmente coloridos até a total perda de cor também são de grande valia, pois na medida em que se conhece o comportamento perante as diversas temperaturas, melhor será o conhecimento da estabilidade da cor da amostra em questão.

A m e t i s t a

Com o contínuo aquecimento, a ametista pode tornar-se completamente incolor, ou cores amarelas e verdes podem desenvolver-se em temperaturas que variam dos 300 a 560°C. Nas ametistas de Minas Gerais ainda não se observaram cores amarelas após o aquecimento, sendo que cores verdes já foram registradas, como nas famosas ametistas de Montezuma. Sob doses de irradiações elevadas, algumas amostras desenvolvem a cor fumê. Como as ametistas são variedades gemológicas que alcançam preços elevados no mercado devido a sua cor violeta, tons fumês tornam-se indesejados, pois diminuem o preço da gema. No entanto, tons fumês em ametistas podem ser filtrados através de tratamentos térmicos em temperaturas que não ultrapassem 300°C, beneficiando a gema que ficará apenas com a cor violeta.

Exposições demasiadas ao sol podem prejudicar a natureza foto-estável de ametistas de determinadas regiões. Investigações sistemáticas da foto-estabilidade da ametista ainda não foram realizadas. Experimentos informais sobre a perda de cor dessa variedade têm mostrado que muitos geodos de ametista do sul do Brasil perdem 1/3 de sua cor após dois meses sob a luz do sol. Um observador cuidadoso pode perceber que grande parte dos geodos de ametista usados em propostas decorativas apresenta cores pálidas após serem colocados em locais iluminados, certamente isso é o resultado do decaimento fotoquímico dos centros de cor do mineral.



Foto 3. Garimpo de ametista de Montezuma (Norte de Minas Gerais). A ametista retirada deste depósito adquire tonalidades esverdeadas após tratamento térmico (prasiolita). (Foto: Antonio Liccardo).

Citrino

A maioria dos citrinos que se encontram no mercado são na realidade ametistas 'queimadas', ou seja, tratadas termicamente em fornos convencionais, ou ainda quartzo fumê que, após tratamento térmico adequado, desenvolve o laranja ou amarelo típico do citrino.

A ametista de algumas regiões do Brasil, como Rio Grande do Sul e Pará tornam-se amarelo-clara sob temperaturas em torno de 470°C, e amarela escura a parda-avermelhada entre temperaturas de 550-560°C, enquanto alguns quartzos fumê tomam a cor do citrino a aproximadamente 300-400°C (Schmetzer 1989). Todos os citrinos aquecidos tem uma coloração avermelhada, enquanto os naturais são amarelos pálidos.

Citrinos laranja-amarronzados naturais da Província Gemológica de Minas Gerais podem ter sua cor intensificada através de tratamentos térmicos a aproximadamente 300°C, pois tal processo retira os tons marrons que existem nessa variedade, aumentando assim a tonalidade laranja, agregando mais valor a gema em questão.

Grande parte do material disponível no mercado atualmente é produzidos por aquecimento da ametista de Pau d'Arco (PA), do Rio Grande do Sul e do Uruguai. Desse modo, com o tratamento desse material, Minas Gerais pode chegar a ser um grande produtor de citrinos de cor laranja e laranja-amarronzados. Os principais produtores de citrinos tratáveis do Estado são as regiões pertencentes à Província Gemológica Oriental Brasileira.

Com frequência, os citrinos são denominados erroneamente de topázios, sendo que alguns comerciantes acrescentam alguns qualificativos tais como: topázio da Bahia, de Ouro, de Madeira, de Palmeira, Rio Grande, etc.

Os citrinos de cores naturais são raros. Existem lavras no Brasil (Bahia, Goiás e Minas Gerais), República Malgaxe, E.U.A. (Pikes Peak, Colorado), Espanha (Córdoba e Salamanca), na antiga U.R.S.S. (Mursinka, Urais), França e Escócia. Sua cor parece estar também relacionada a impurezas de ferro, assim como na ametista, porém em outro estado de oxidação, que no citrino seria o Fe^{3+} .

A origem da cor dos citrinos ainda é assunto controverso. O estado do conhecimento sobre esse assunto sugere que os citrinos derivados de ametistas quando tratadas termicamente, tem sua cor relacionada ao Fe^{3+} . Uma melhor discussão sobre esse assunto pode ser vista em Schmetzer (1989).



Foto 4. Citrino e prasiolita resultantes do tratamento térmico da ametista. (Foto: Antonio Licardo).



Quartzo fumê

O fumê se descolora a temperaturas entre 140-400°C. Sua cor está, principalmente, relacionada a radiação natural em quartzos contendo 'impurezas' de alumínio. Através da combinação de irradiação e tratamento térmico, alguns cristais de Minas Gerais tornam-se laranja-amarronzados, principalmente os da região da Província Gemológica Oriental Brasileira. Entretanto, amostras provenientes da Serra do Espinhaço tem maior estabilidade do que as provenientes da província.

Estudos qualitativos relataram que os quartzos fumê naturais poderiam ser descoloridos aquecendo-se a 600°C durante 5 min, porém o método mais adequado seria o que envolve temperaturas em torno de 400°C durante 10 min, pois não modificam a estrutura cristalina do mineral cujo limite é de 573°C. Entre tanto, nos depósitos de Minas Gerais, citrinos de cor laranja, marrom-alaranjada e marrom, podem também ser obtidos a partir do aquecimento a baixas temperaturas (150°C e 250°C) de quartzos fumê pegmatíticos (região de Itinga), bem como também a partir da irradiação de quartzos hialinos dessa mesma região, seguida de subsequente tratamento térmico a baixas temperaturas.

Quartzo róseo

Em Minas Gerais o quartzo róseo ocorre em veios maciços e raramente sob a forma de cristais euédricos. Ambos são fundamentalmente diferentes quanto à origem de sua coloração, sua foto-estabilidade e seu espectro de absorção. Porém, ocorrem somente em ambiente pegmatítico. A cor do quartzo róseo é estável até 575°C, entretanto, em cristais bem formados sua cor apresenta baixa estabilidade e desaparece a aproximadamente 200°C, o que possivelmente torna sua cor ligada a um centro de cor tendo o fósforo como elemento principal.

Quartzo verde

O quartzo verde (prasiolita) propriamente dito já foi registrado Por meio de tratamento térmico de ametistas da região de Montezuma (norte de Minas Gerais), Entretanto quartzos verde-amarelados provenientes de irradiação e subsequente tratamento térmico de quartzo hialino de determinadas regiões de Minas Gerais não podem ser considerados prasiolitas (Schmetzer 1989). Segundo esse autor, eles devem ser considerados citrinos e não devem ser classificados separadamente. A ocorrência desse tipo de citrino tem sido registrada em ambiente pegmatítico, como por exemplo nas lavras de São José da Safira (Minas Gerais). Entretanto, em Cristalina (Goiás) já foram registradas ocorrências dessa variedade em depósitos hidrotermais. Sua coloração deve-se à presença de Fe^{2+} (Rossman 1994). Em alguns casos a irradiação desenvolve tons fumê indesejáveis que são filtrados em temperaturas entre 150 e 250°C.

Em Minas Gerais, o tratamento térmico em quartzo é na maioria dos casos subsequente ao tratamento por irradiação. Quartzos naturais ou produzidos por irradiação apresentam tons escuros que podem ser filtrados pelo subsequente tratamento térmico para se tornarem mais viáveis economicamente. Foram registrados os seguintes tratamentos térmicos de quartzos de Minas Gerais.

1- Ametistas naturais ou produzidas por irradiação que apresentem tons escuros têm estes tons retirados pelo tratamento térmico. Como em Buenópolis na Lavra da Fazenda Rainha.

2- Quartzos de cor fumê produzidos por irradiação quando tratados termicamente adquirem 2 tonalidades, verde oliva (*Olive*) ou verde-amarelado (*Green-Gold*). Como em São José da Safira.

3- Quartzos de cor fumê produzidos por irradiação, quando tratados termicamente, adquirem 3 tonalidades, amarelo intenso (Beer), amarelo-amarronzado (*Cognac*) e marrom-laranjado (*Whiskey*). Como em São José da Safira.

4- Quartzos fumê naturais, quando tratado termicamente, transformam-se em citrinos amarelo. Como nos quartzos da Região de Itinga e Araçuaí (lavra Teixeira).



5- Ametistas de Montezuma quando submetidas a tratamento térmico, transformam-se em quartzo verde (prasiolita).

6- Ametistas de coloração pálida da Serra do Sudário, São Caetano, fornecem citrinos de cor amarelo intenso.

O tratamento do quartzo fumê irradiado ou natural, na maioria dos casos, culmina no desbotamento total da amostra. A descoberta de uma mina cujo tratamento térmico proporcione o aparecimento de uma variedade colorida, seja ela verde, amarela, ou violeta depende exclusivamente do ambiente geológico de crescimento do cristal.

A identificação do tratamento térmico em quartzo é muitas vezes impossível; características internas e análises apuradas como Ressonância Paramagnética Eletrônica podem, às vezes, apontar um possível aquecimento. Na Tabela 2, são apresentados os resultados mais comuns do tratamento térmico nas variedades do quartzo (Nassau 1994).

Tabela 2 Resultados de tratamento térmico de quartzo, segundo Nassau (1994).

Cor original ou variedade gemológica	Cores obtidas no decorrer do processo
Fumê	Fumê pálido → amarelo - esverdeado → verde → azul - esverdeado → azul ou incolor
Ametista	Incolor a verde
Rosa	Pálida a incolor
Azul	Modifica o azul ou incolor
Amarelo ou marrom	Vermelho ou vermelho acastanhado
Faturamento - para tingimento, formação de aspecto leitoso ou iridização do quartzo	

Topázio

O tratamento térmico é aplicável somente no topázio imperial, de coloração laranja-avermelhado. Normalmente, o topázio é aquecido a temperaturas em torno de 400-500°C e perde sua tonalidade amarela, restando os tons vermelhos. Os objetivos do tratamento térmico em topázio imperial são: a uniformização da cor, no caso de gemas com bandamento, o aumento da intensidade de vermelho, e a mudança da cor castanha para o rosa. Embora as colorações pêssego e rosa não ocorram naturalmente, podem ser obtidas de topázio amarelo-castanho ou laranja, através de tratamento térmico.

O topázio azul raramente existe na natureza, porém, há algumas décadas atrás descobriu-se que cristais incolores podem adquirir desejáveis tons de azul. Subseqüente tratamento térmico aplicado em topázios amarronzados ou verde-amarronzados, produzidos por irradiação, retira centros de cor amarelo considerados menos estáveis, deixando apenas o azul comercial conhecido como azul cobalto.





63



Foto 5. Topázio azul produzido por irradiação Gama. Ao fundo, material levemente azulado antes do tratamento. (Foto: Antonio Liccardo).

Tratamento por Irradiação

Exposições de gemas à radiação, natural ou artificial, são capazes de mudar a cor de muitos minerais. Alguns processos de tratamento, como a irradiação e o tratamento térmico, apenas aceleram o processo que poderia ter sido ocasionado pela própria natureza.

Grande parte das gemas tem como causa de cor a presença de defeitos em sua rede cristalina, conhecidos como 'centros de cor'. Tais centros podem ser ativados pela radiação natural presente nos depósitos ou pela irradiação de gemas em indústrias e laboratórios. As gemas tratadas por esse processo são, principalmente, topázios, quartzos, turmalinas, alguns berilos, como heliodoro e Morganita, e diamantes verdes e amarelos.

Os processos atômicos que acompanham as mudanças, assim como o entendimento do processo ocorrido na maioria das mudanças de cor induzidas por irradiação, não são ainda totalmente compreendidos. Normalmente a espectroscopia de absorção óptica deve ser acompanhada por ressonância paramagnética eletrônica e outras técnicas sofisticadas para fornecer respostas mais detalhadas das causas de cor em minerais submetidos à irradiação.

Tipos de Radiações

Para a irradiação de gemas, são usados principalmente raios-X, raios Gama, Nêutrons e Aceleradores de elétrons (*electron beam*). Os raios-X, por apresentarem baixa penetração, fazem com que as gemas coloridas por esse processo não se tornem comercialmente viáveis. Por outro lado, a irradiação Gama é um tratamento mais penetrativo. Utiliza o cobalto-60 como isótopo mais comum e proporciona melhores resultados. Tanto os raios-X como os Gama não deixam radioatividade residual na gema.



Foto6. Quartzo verde amarelado conhecido no comércio como *green-gold*. Essa variedade colorida de quartzo é produzida por irradiação Gama a partir de material completamente incolor. (Foto: Maurício Favacho).

Tabela 3 Comparações entre as diferentes formas de irradiação em gemas.

Irradiação	Vantagens	Desvantagens
Raios-X	Maior disponibilidade de equipamentos para pesquisas iniciais de causas de cor em gemas	Baixo poder de penetração Inviável comercialmente Baixa uniformidade na cor
Raios Gama	Viável comercialmente Poder de penetração relativamente alto Não deixa resíduos radioativos na gema Boa uniformidade na cor	Menores taxas de doses requerem atmosfera inerte
Nêutrons	Viável comercialmente (quando deixa em quarentena) Alto poder de penetração Boa uniformidade na cor	Deixa resíduos radioativos
Aceleradores de elétrons	Emissão controlável Não possui radioatividade residual Uso de energia elétrica (a máquina pode ser desligada)	Baixa penetrabilidade A aplicação de doses mais elevadas é muito complicada





A irradiação neutrônica apresenta energia maior que os raios-X e Gama, com maior poder de penetração no material, proporcionando, assim, colorações mais intensas. Entretanto, é necessário um período de quarentena, pois tal tratamento torna a gema radioativa.

Os aceleradores de partículas apresentam limitado poder de penetrabilidade, muito menor que a irradiação Gama, por exemplo. Oferecem, no entanto, as vantagens de sua fonte não ter radioatividade residual e usar energia elétrica, a qual pode ser desligada quando não estiver operando. A Tabela 3 mostra as principais diferenças entre os tipos de irradiação.

Principais Gemas Tratadas com Irradiação

Minas Gerais conta com uma das maiores reservas gemológicas do mundo, também no que se refere a materiais beneficiáveis por irradiação. A exploração adequada desse material poderá manter constante a produção no Estado e posicioná-lo, nos próximos anos, como o maior produtor de gemas tratadas. Devido à recente aceitação de gemas tratadas pelo mercado joalheiro, deu-se início a uma corrida em busca de 'fórmulas' para melhoramento ou modificação de cor em gemas provenientes de diversas regiões do Estado.

As principais gemas susceptíveis aos tratamentos por irradiação produzidas em Minas Gerais atualmente são as variedades de quartzo, topázio, turmalinas e berilos, e há alguns testes em diamantes.

Quartzo

O quartzo apresenta como principais impurezas o alumínio e o ferro, que ocorrem naturalmente em sua estrutura. São eles que vão favorecer o aparecimento de centro de cor, quando expostos a uma radiação ionizante natural ou artificial. A ametista e o citrino, variedades violeta e amarela de quartzo, são provenientes da irradiação de quartzo incolor com alto conteúdo de ferro. Alguns quartzos de localidades específicas de Minas Gerais, como por exemplo São José da Safira, adquirem a coloração amarelo-esverdeada e, pesquisas recentes mostram o ferro como participante na coloração dessa variedade.



Foto 7. Quartzo irradiado em formas de lapidações variadas, comercialmente denominado *green gold*. (Foto: Antonio Liccardo).

Diversos depósitos de quartzo incolor provenientes de regiões da Serra do Espinhaço em Minas Gerais, notadamente Buenópolis e Corinto, produzem ametistas após irradiação. É comum, também, a irradiação de quartzo incolor que culmina no aparecimento de quartzo fumê. No entanto, essa é a variedade de quartzo de preço mais baixo quando comparado com as demais, e sua irradiação por vezes não é viável. *Green Gold, Cognac, Whiskey, Beer* são alguns nomes comerciais aplicados a quartzos verde amarelados produzidos inteiramente pela irradiação artificial de laboratório.

Topázio

O topázio azul pode ser tratado por meio de 3 diferentes tipos de processos envolvendo irradiação.

1) *Gamma Cells* e Unidades de Radiação Gama - Exposição a fonte de radiação Gama (comumente cobalto-60) produz ambos centros de cores azul e amarelo em alguns topázios, resultando em cores marrom ou verde-amarronzados. Subseqüentes tratamentos térmicos removem o centro amarelo de cor por ser o menos estável, sem afetar o centro de cor azul. Apesar de o tratamento por irradiação Gama não ser capaz de produzir tons azuis intensos, apresenta o aspecto positivo de não deixar resíduos radioativos. O azul claro produzido pela irradiação Gama tem sido denominado pelo comércio de gemas como azul cobalto. Topázio azul escuro produzido por irradiação Gama é, freqüentemente, azul-acinzentado (azul aço).

2) Aceleradores Lineares ou Aceleradores de elétrons (*Electron Beam*) - O topázio pode ser exposto a alta energia dos aceleradores de elétrons. Esse processo gera considerável quantidade de calor e o topázio é resfriado com água para evitar o choque térmico e a destruição espontânea dos centros de cor. O processo deve ser seguido por tratamento térmico para destruir o centro de cor amarelo, menos estável. O resultado é tipicamente uma pedra de azul forte sem tons cinzas. No comércio, o nome comum produzido por esse processo é o *Sky Blue*. Porém, nesse processo a gema pode tornar-se radioativa por um curto período de tempo, que devem ser deixadas 'descansando' por mais ou menos duas semanas objetivando a redução de seus níveis de radiação residual.

3) Reatores Nucleares- Topázios expostos a irradiação neutrônica produzem cor azul. Nenhum tratamento térmico subseqüente é usado após esse processo. A cor é comumente um azul acinzentado médio até um azul acinzentado forte descrita como *steely* (cor de aço). O nome comercial para o produto irradiado com neutrons é *London Blue*. O tratamento térmico pode ser



Foto 8. Topázio incolor natural, que após irradiado adquire as tonalidades *Sky blue* (mais clara) e *London Blue* (mais escura). (Foto: Antonio Liccardo).





usado para clarear um pouco a gema. O material tratado por esse processo torna-se radioativo e exige vários meses de estocagem, até a radioatividade decair para níveis mais seguros. Todo material tratado dessa forma depende da jurisdição da Comissão da Regulamentação Nuclear, em que todos os produtores e importadores devem ser licenciados pela NRC (Nuclear Regulatory Commission).

4) A combinação de tratamentos - Tratamentos combinando reator nuclear, acelerador linear e aquecimento produzem azul escuro intenso porém diferente do *London Blue*. Nomes comerciais para esse material incluem *Electra Blue*, *Super Blue*, *New Blue*, *Swiss Blue*, *Max Blue*, *American Blue*, *California Blue*, e *Super Sky Blue*.

O topázio incolor de Minas Gerais é famoso pelos resultados obtidos em tratamento por irradiação. Estudos realizados pela EMBRARAD - Empresa Brasileira de Radiações LTDA mostram que a irradiação com raios Gama em topázio incolor produz basicamente duas cores: o vermelho amarronzado e o azul. Todas as outras cores são resultados das combinações dessas duas.

A cor vermelho-amarronzada pode assumir uma cor vermelha bem mais intensa, se o cristal tiver sido pré-aquecido em temperatura alta, por uma semana, o que provoca a extinção total da coloração azul. Essa cor decai totalmente após a exposição ao sol por cinco dias, deixando, porém um tom cinza residual.

A cor azul existe independente da cor marrom, embora as duas apareçam conjuntamente numa mesma gema após a irradiação. A distinção entre o topázio azul natural e o azul irradiado, muitas vezes, não é possível, principalmente com o equipamento gemológico convencional.

O topázio imperial de coloração amarela, quando irradiado, apresenta um vermelho intenso que não é permanente, decaindo facilmente após exposição à luz solar.

B e r i l o

As mudanças e/ou melhorias de cor em berilos por meio de irradiação têm sido mencionadas por vários autores (Bank 1982; Lind *et al.* 1985; Schrade 1988; Schmetzer 1989, 1993; Rink *et al.* 1990, entre outros). Nesses trabalhos, têm sido usados vários tipos de irradiação para produzir centros de cor, como raios-X, Gama, Nêutrons, Elétrons e até mesmo raios Ultravioleta.

A presença do Fe^{2+} no berilo pode produzir, após irradiação, gemas amarelas a partir de incolores, berilos azuis produzem berilos verdes e berilos de cor rosa produzem berilos de cor laranja (Nassau 1994).

Schmetzer (1989), a partir do espectro de absorção de vários berilos verdes irradiados, atribuiu a banda de absorção do centro de cor violeta, com máxima absorção no verde, a um centro de cor do tipo buraco e elétron do oxigênio, devido à substituição do Si^{4+} por Al^{3+} no sítio tetraédrico. As bandas de absorção dos centros amarelos, com máxima absorção no ultravioleta, foram atribuídas a traços de ferro. Esses centros foram confirmados por Rink *et al.* (1990) em berilos irradiados com elétrons, propondo o processo de oxidação de Fe^{2+} para Fe^{3+} como consequência da irradiação.

O berilo azul profundo, tipo Maxixe, pode ser também produzido por tratamento com raio Ultravioleta, sendo distinguível da água-marinha em três aspectos: o berilo 'azul Maxixe' é visualmente diferente do azul da água-marinha; a cor da gema irradiada cai exclusivamente no raio ordinário, o que não ocorre com a cor da água-marinha natural; e a coloração pós-irradiação decai por exposição à luz solar.

Em esmeraldas naturais, nem tratamento térmico nem irradiação afetam as cores verdes produzidas por impurezas de cromo e vanádio, porém, pode ser possível remover o amarelo se for causado pela presença adicional do ferro. Por outro lado, a irradiação em qualquer tipo de esmeralda sintética pode produzir cores violeta, fumê ou preta. A maior parte dessas cores apresenta baixa estabilidade termal e desaparece em altas temperaturas (Schmetzer 1993).

Segundo Nassau (1994), a irradiação pode restaurar a cor rosa de morganitas descoloridas por tratamento térmico. Desse modo, um berilo incolor natural pode ser transformado em morganita ou uma morganita muito pálida pode ter sua cor intensificada por irradiação. Os principais resultados obtidos por irradiação em berilos são: adicionar cor amarela, azul para verde; incolor para amarelo; rosa para laranja; adicionar ou intensificar rosa (morganita); adicionar azul Maxixe, cores fracas para azul intenso, amarelo para verde intenso; adicionar negro, enfumado ou violeta (Nassau 1994).

T u r m a l i n a s

Na irradiação, assim como no tratamento térmico, dois efeitos distintos podem ocorrer: a intensificação ou a remoção de cor. O efeito da irradiação por raios Gama e posterior tratamento térmico nas turmalinas revelou três principais grupos de mudança de cor: de incolor para rosa, de rosa para amarelo e de incolor para amarelo. Podem ocorrer ainda, a intensificação da cor levemente rósea, a intensificação da cor azul nas turmalinas bicolores e o aparecimento da cor amarela, dependendo da origem da gema.

Algumas turmalinas da região do Morro Redondo, em Coronel Murta, levemente rosadas, após prévio aquecimento e submetidas a unidade de irradiação, passam para um róseo-avermelhado intenso, totalmente aceito no mercado.

Todas as cores mencionadas em turmalinas são permanentes sob ação da luz solar, mas podem ser destruídas por aquecimento em temperaturas de 250 a 400°C. Na Tabela 4, são apresentados os principais resultados descritos por Nassau (1975, 1984 e 1994).

Tabela 4 Os principais tratamentos por irradiação no grupo da turmalina.

Cor original	Agente utilizado	Cor obtida
Incolor	Ultravioleta Elétrons	Laranja avermelhada Violeta Vermelha
Vermelho claro	Raios X	Amarelo claro
Rosa	Raios X	Púrpura avermelhada
Vermelha	Ultravioleta	Violeta Amarelo
Verde claro	Raios Gama	Amarelo esverdeado e cinza
Amarelo	Raios Gama	Pêssego
Azul	Raios Gama	Violeta
Rosa	Raios Gama	Amarelo ou alaranjado

D i a m a n t e s

As irradiações Neutrônica e Gama induzem a cor verde e amarelo ao diamante, de acordo com o conteúdo de impurezas do cristal. Em particular, o diamante verde está relacionado ao fenômeno de centro de cor. Diamantes incolores com uma película amarelada da região de Jequitai apresentaram mudança para o verde, quando irradiados com Nêutrons. Não mostraram



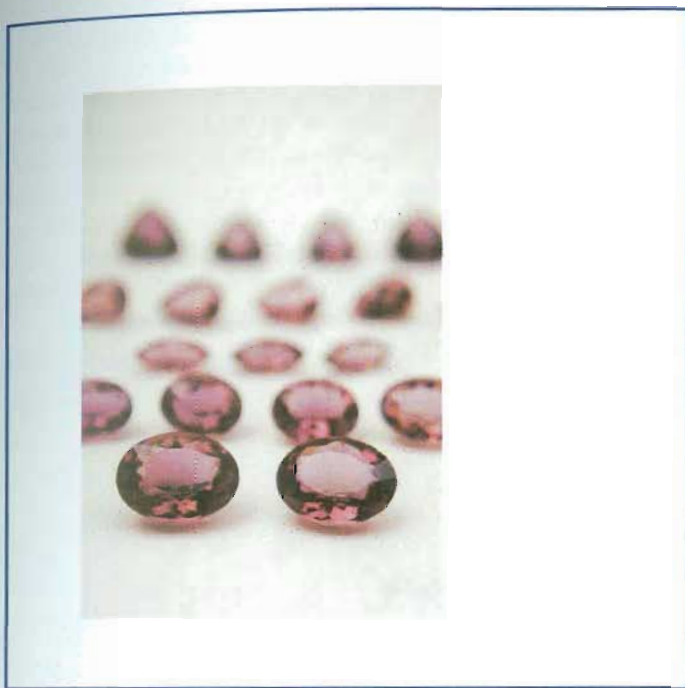


Foto9. Variedade de turmalina tratada por irradiação Gama. Antes do tratamento a gema apresentava-se levemente rosada. (Foto: Maurício Favacho).

radioatividade residual e, ao serem aquecidos, alguns passaram para cores castanhas (Bottino *et al.* 2000). É possível que bons resultados no tratamento dos diamantes, principalmente da Serra do Espinhaço, possam agregar valor aos cristais de colorações amareladas.

D i f u s ã o

Tratamento termoquímico consiste em introduzir impurezas na gema, por processos de difusão de óxidos sob altas temperaturas (1600 a 1900°C) e durante um período de tempo que varia de acordo com o tipo da amostra. Essencialmente, a dopagem da amostra ocorre colocando-se a gema lapidada em uma mistura de pós de óxidos metálicos dentro de um cadinho, seguido de aquecimento em alta temperatura e atmosfera adequada, originando, com isso, uma camada muito colorida de espessura fina e de boa estabilidade. O tratamento por difusão é usado principalmente para:

- 1- Uniformização da cor de rubis e safiras sintéticas usando temperaturas na média de 1700°C.
- 2- Indução de inclusões (fingerprints) em coríndon sintético semelhantes às inclusões de coríndons naturais.
- 3- Desenvolvimento de asterismo envolvendo a difusão de óxido de titânio em coríndon.
- 4- Criação de uma fina camada superficial, principalmente, em coríndon e topázio utilizando óxidos.

As cores produzidas por difusão são tão estáveis quanto às das gemas naturais, o mesmo ocorre com sua durabilidade. De acordo com as normas estabelecidas pela CIBJO, elas devem ser comercializadas com a menção 'gemas naturais tratadas por difusão'.

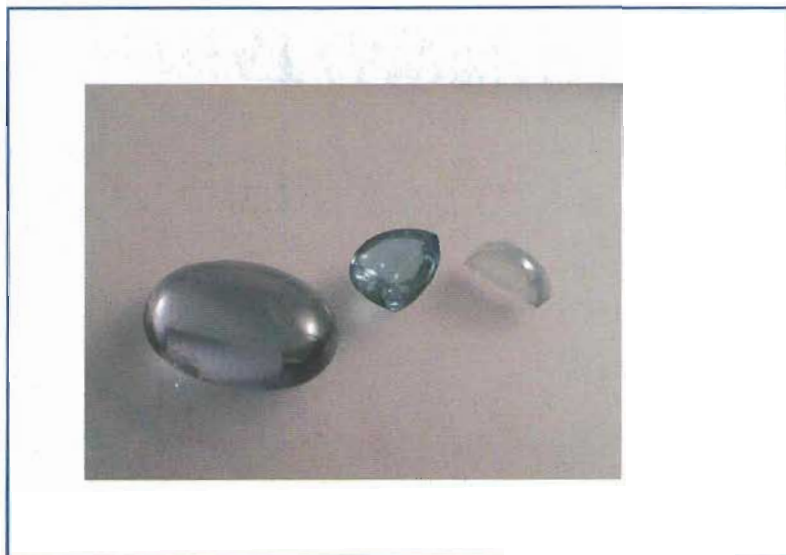


Foto 10. Topázio incolor tratado pelo processo de difusão. O corte da gema à direita mostra a penetração do tratamento para a cor azul, limitado à superfície. (Foto: Antonio Liccardo).

Aspectos Mercadológicos das Gemas Tratadas

Por razões éticas, todos os tratamentos empregados a uma gema devem ser comunicados ao cliente no ato da compra. Desse modo, é de responsabilidade do vendedor relatar todas as informações pertinentes ao tratamento que, porventura, a gema tenha sido submetida. Essas informações são exigidas pela Comissão Federal de Comércio (FTC - Federal Trade Commission) e pelo comitê de vigilância dos joalheiros (Jewelers Vigilance Commitee) para uma prática e justa forma de comércio. No Brasil, o IBGM- Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos juntamente com a ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas atuam de forma a normalizar e normatizar o setor joalheiro-gemológico do país quanto aos diferentes tratamentos aplicados em gemas, prática essa, que vem sendo conhecida como *disclosure* (esclarecimento, em português).

Os principais fatores pertinentes ao tratamento em relação ao mercado de gemas são a não modificação da estrutura original do mineral, a estabilidade do resultado e o custo do processo. Alguns tratamentos são similares a processos que ocorrem na natureza, como o tratamento térmico e a irradiação. Outros, como o tratamento por difusão, alteram profundamente a gema tratada.

Atualmente, existem quatro Normas Brasileiras sendo utilizadas pelo setor joalheiro, sendo duas na área de gemas e duas para o ouro: a primeira, a NBR 10.630, classifica os materiais gemológicos e apresenta o modelo para emissão do Certificado de Identificação da Gema; a segunda, a NBR 12.254, refere-se à classificação de diamantes, a terceira, a NBR 8.000, fixa as condições exigíveis para a comercialização de ouro refinado; e a quarta, a NBR 8.001, prescreve os métodos para a determinação do título de ouro refinado (copelação e espectrofotometria de absorção atômica).

Minas Gerais conta com uma das maiores reservas gemológicas do mundo, no que se refere também a materiais beneficiáveis por diferentes tratamentos. A exploração adequada desse material manterá constante a produção de gemas do Estado que certamente irá figurar nos próximos anos como o maior produtor de gemas tratadas.





O pleno domínio das técnicas de irradiação e tratamento térmico aplicado as gemas de Minas beneficiará também o segmento da mineração que terá nas mão um novo filão mineral para explorar; os dos depósitos beneficiáveis de gemas. O desenvolvimento da tecnologia dos tratamentos pode promover a valorização das gemas de baixa qualidade e aumentar a competitividade no mercado, resultando no aumento de divisas para o país.

Gema tratada não significa gema artificial. Alguns processos de tratamento como a irradiação e o tratamento térmico apenas aceleram o processo que poderia ter sido dado pela própria natureza. Desse modo, antes do estabelecimento de qualquer norma para os diversos tratamentos aplicados em gemas, deve ser levada em consideração principalmente a não modificação da estrutura cristalina original do mineral. Então teremos dois patamares bem distintos: gemas cujo tratamento modifica a estrutura original do mineral (ex. difusão de óxidos), e gemas cujo tratamento não modifica a estrutura mineral (ex. irradiação e tratamento térmico).

Como se pode perceber a normatização e normalização no que se refere aos tipos de tratamentos de gemas precisa ser mais refinada.

Por proposição do IBGM, um grupo de estudo foi criado, em agosto de 1993, pelo Comitê Brasileiro de Siderurgia e Mineração - CBI/ABNT, para a elaboração de duas novas normas técnicas para o setor.

Em consequência do trabalho que vem sendo desenvolvido pelo Setor, a ABNT acatou proposta do IBGM e criou o CB33 - Comitê Brasileiro de Normalização para Joalheria, Gemas, Metais Preciosos e Bijuteria, cuja coordenação está a cargo do IBGM.



Foto 11. Variedades coloridas de quartzo produzidas por irradiação Gama (Co-60).
(Foto: Maurício Favacho).

Bibliografia Consultada

- AGTA 1993, 1997. The Gemstone Enhancement Manual. 2 ed., 4 ed. Dallas, Texas, USA, American Gem Trade Association (AGTA).
- Applin, K.R. & Hicks, B.D. 1987. Fibers of dumortierite in quartz. *American Mineralogist* 72:170-172.
- Anderson, L.O. 1979. The difference between Maxixe beryl and Maxixe-type beryl: An electron paramagnetic resonance investigation. *Journal of Gemmology*, 16(5):313-317.
- Ashbaugh III, C.E. 1988. Gemstone irradiation and radioactivity. *Gems & Gemmology*, 24 (4): 196-213.
- Bastos, F.M. 1975. Maxixe type beryl. *Lapidary Journal*, 28(10): 1540-2.
- Belov, L.V. 1970. Methans and atomic hydrogen in some natural minerals. *Geochimia*, 7: 853-856.
- Bershov, L.V.; Martirosyan, V.O.; Marfunin, A.S.; Plantanov, A.N.; Tarasschan, A.N. 1969. Color centers in lithium tourmaline (elbaite). *Soviet Physics Crystallography*, 13:629-630.
- Bill, H. & Callas, G. 1978. Color center associated rare-earth ions and the origin of coloration in natural fluorites. *Physics and Chemistry of Minerals*, 3: 117-131.
- Blak, A R.; Isotani, S.; Watanabe, S. 1982. Optical Absorption and Electron Spin resonance in blue and green natural beryl. *Physics and Chemistry of Mineral*, 8: 161-166.
- Blak, A R.; Isotani, S.; Watanabe, S. 1983. Optical Absorption and Electron Spin resonance in blue and green natural beryl: A reply. *Physics and Chemistry of Mineral*, 9: 279-280.
- Bottino, E.C.C. Chaves, M.L.S.C., Stasiulevicius R., Medeiros A.B. 2000. Tratamentos por irradiação e queima em diamantes da região de Jequitai (MG): uma alternativa econômica para depósitos de baixos teores. *Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas I. Boletim de Resumos. Ouro Preto, MG. 4.*
- Brown, G. 1990. Biron synthetic pink beryl. *Australian Gemmologist*, 17(6): 219-221.
- Cox, R.T. 1977. Optical absorption of the d4 ion Fe4+ in pleochroic amethyst quartz. *Journal of Physics*, C10: 4631-43.
- De Camargo, M.B. & Isotani, S. 1988. Optical absorption spectroscopy of natural and irradiated pink tourmaline. *American Mineralogist*, 73:172-180.
- Hughes, R. W. 1990. *Corundum*. Butterworths Gembooks, London, 314p.
- Hughes, R. W. 1995. A brief history of heat. *Australian Gemmologist*, 19: 52-54.
- Isotani, S.; Albuquerque, A R.P.L.; Dotto, C.T.; Dias, O.O L. 1987. Tratamentos térmicos e irradiação em cristais naturais. *Revista da Escola de Minas*, 40 (3): 11-14.
- Kammerling, R.C.; Koivula, J.I.; Kane, R.E. 1990. Gemstone enhancement and its detection in 1980s. *Gems & gemology*, 26 (1): 32-49.
- Kammerling, R.C. & Moses, T.M. 1995. Describing gemstone treatments: an overview of the categories used by GIA. *ICA Gazette*, June: 8-10.
- Kane, R.E.; McClure, S.M.; Menzhausen, J. 1990. The identification of blue diffusion-treated sapphires. *Gems & Gemmology*, 26 (2): 115-133.
- Lindberg, J. D. 1972. Changing the colors of transparent gemstones. *The Lapidary Journal*, 26 (4): 604-611.
- Nassau, K. 1975. Gamma Ray Irradiation Induced Changes in the Color of Tourmalines. *American Mineralogist*, 60:710-713.
- Nassau, K. 1978. The origins of color in minerals. *American Mineralogist*, 63: 219-229.
- Nassau, K. 1980. The causes of color. *Scientific American*, 243: 106-123.
- Nassau, K. 1983. The physics and chemistry of color. The fifteen causes of color. 1 ed. New York. John Wiley & Sons, 453p..
- Nassau, K. 1984. *Gemstone Enhancement*. 1 ed. Londres, Butterworths. 221p.
- Nassau, K. 1994. *Gemstone Enhancement: history, science and state of the art.* 2 ed. Londres, Butterworths-Heinemann Ltd. 252p.
- Nassau, K.; Prescott, B.E.; Wood, D.L. 1976. The deep blue Maxixe-type color center in beryl. *American Mineralogist*, 61: 100-107.
- Nixon, N.S. 1977. The alteration of colour of gemstones. *Australian Gemmologist*, 13 (3): 85-88.
- Reinitz, I.M. & Rossman, G.R. 1988. Role of natural radiation in tourmaline coloration. *American Mineralogist*, 73: 822-825.



Rink, W.J.G. & Plendl, H.S. 1990. Coloration in Electrons-irradiated Beryl. *Journal of Gemmology*, 22: 33.

Rossmann, G.R. 1982. Irradiation of colored gemstone. In: *International Gemological Symposium, Santa Monica, California, USA, Proceedings...*, Gemological Institute of America (GIA), 91-99

Sabioni, A.C.S. & Ferreira, C.M. 1996. Alguns aspectos técnicos e econômicos do tratamento térmico de gemas. *Revista da Escola de Minas*, 49 (1): 60-66.

Schmetzer, K. 1989. Methods for the distinction of natural and synthetic citrine and prasiolite. *Journal of Gemmology*, 21:368-391.

Schmetzer, K. 1993. Radiation-induced colour change in natural and synthetic emerald. *Journal of Gemmology*, 23 (5): 288-293.

Themelis, T. 1992. The heat treatment of ruby and sapphire. 1st ed. USA, Gemlab Inc, 236p.

Vultée, J.V. 1955a Über die orientierten verwachsungen von rutil in quarz. *N Jb Min Abh*, 87:389-415.

Vultée, J.V. 1955b. Die verwachsungsgesetze der orientierten einlagerungen von rutil in quarz. *Z Krist*, 107:1-17.

Vultée, J.V. & Lietz, J. 1956. Über die rolle des titans als färbungsursache von blau-und rosenquarzen. *N Jb Naturwiss*, 3:49-58.



capítulo quatro

Preenchimento de Fraturas em Esmeraldas

G a b r i e l d e O l i v e i r a P o l l i

I n t r o d u ç ã o

A tecnologia do tratamento de gemas permite que gemas de preços mais baixos devido à cor pouco atrativa, a inclusões, ou outras características negativas sejam transformadas em gemas de melhor qualidade por intermédio de modificação ou eliminação artificial desses aspectos indesejáveis.

As esmeraldas brasileiras tornaram-se conhecidas no setor gemológico internacional há menos de vinte anos, devido à criação de cursos de gemologia e centros gemológicos, como os do Departamento de Geologia da Escola de Minas da UFOP, e, principalmente, por meio de publicação de artigos técnico-científicos nacionais e internacionais. Esses trabalhos proporcionaram a divulgação e conseqüente aceitação dessas gemas no mercado internacional em igualdade de condições com as tradicionais esmeraldas colombianas. Todavia, pouco se sabe sobre as técnicas de melhoria da beleza das nossas esmeraldas.

Tratamento de Esmeraldas

As inclusões podem ou não mudar ou afetar a cor das gemas. As inclusões incolores não modificam a cor da gema, mas reduzem a sua transparência ou diafaneidade. Por outro lado, as inclusões coloridas proporcionam uma cor à gema que é uma combinação ou mistura da cor original e a cor da inclusão.

Em relação às esmeraldas, as inclusões incolores são geralmente fraturas e cavidades. Uma esmeralda típica apresenta fraturas e cavidades, distribuídas aleatoriamente, de diferentes morfologias. Para melhorar a transparência ou diafaneidade das esmeraldas, essas inclusões podem ser eliminadas ou minimizadas por impregnação, processo em que há preenchimento das fraturas e cavidades com fluido ou substância com um índice de refração o mais próximo possível ao da esmeralda.

O principal problema encontrado nas esmeraldas é a presença de inclusões, cuja maioria constitui-se de fraturas ou cavidades internas parcialmente cicatrizadas ou preenchidas por líquido e/ou gás. Ao efetuar-se a lapidação, parte dessas fissuras e cavidades chega até a superfície, transformando a gema em um objeto mais frágil e com o aspecto visual alterado. Além disso, a presença do fenômeno da interferência da luz, originado pelas inclusões, também altera a transparência da gema.

As esmeraldas com fraturas na superfície e outras cavidades são rotineiramente tratadas com óleos, resinas sintéticas e outras substâncias para reduzir o relevo dessas feições e, conseqüentemente, torná-las menos visíveis, método denominado 'impregnação com óleo', *oiling*. A maioria desses tratamentos usa, especialmente, preenchimentos incolores. O método 'impregnação com óleo', *oiling*, torna pouco ou nada visíveis as fraturas ou cavidades que têm comunicação com a superfície, ao preenchê-las com um fluido, cujo índice de refração seja muito próximo ao da esmeralda. As esmeraldas podem ser impregnadas ou re-impregnadas em qualquer época, no estado bruto, após a limpeza, após a lapidação, depois de polida, etc.

A prática desse tratamento tem-se convertido em algo habitual para a quase totalidade das esmeraldas encontradas no comércio. Embora a impregnação com óleo incolor ou outras substâncias modifiquem apenas as características de transparência ou diafaneidade da gema, a cor, naturalmente, será intensificada por causa de fraturas e cavidades menos visíveis, bloqueando a passagem de luz. Ocasionalmente, encontramos esmeraldas de qualidade mais baixa que foram tratadas com preenchimentos coloridos, os óleos verdes.

São descritas na literatura mudanças de cor, induzidas por irradiação, em esmeraldas naturais e sintéticas, por meio de experiências realizadas em equipamento de fluorescência de raios X, *gamma cell*, acelerador linear e reator nuclear. As mudanças de cor induzidas nas esmeraldas sintéticas produziram a cor violeta, enfumada ou negra. Entretanto, algumas delas desbotaram em exposição à luz, algumas voltaram à cor original depois do aquecimento a 300°C, mas todas desapareceram a temperaturas mais altas. Foi proposto, também, um sistema de *lasers* flexíveis em relação às frequências, sintonizadas para o bombardeamento de inclusões portadoras de elementos cromóforos. A centralização do feixe de *laser* sobre a área tratada produziria a difusão de elementos na estrutura cristalina do cristal, principalmente nas fraturas, tubos e canais de crescimento, tornando possível, inclusive, a eliminação da tonalidade não desejada, pela erradicação, em determinada zona, do elemento cromóforo responsável.

Uma variedade muito grande de 'gemas compostas' (corpos cristalinos ou amorfs, compostos de duas ou mais partes unidas por cimentação ou qualquer outro método artificial) são montadas por meio do uso do berilo, quartzo, esmeralda, entre outras. Por exemplo, *doublet* de esmeralda combinado com berilo ou esmeralda com uma outra substância natural ou sintética, incluindo a própria esmeralda. É o caso do material denominado em joalheira como *emeraldolite*. Um *triplet* pode ser feito com duas partes de berilo cimentadas por uma camada de cor verde escuro, 'berilo sobre berilo' com uma camada de esmeralda verde a fim de se conseguir a cor desejada, ou 'esmeralda sobre esmeralda' intercaladas por uma fina camada de cimento de cor verde. Conseqüentemente, as inclusões existentes nas duas partes continuam presentes por toda a massa da gema, de forma quase ininterrupta, oferecendo um aspecto de uniformidade, principalmente em se tratando de uma gema com a cintura dissimulada, transformando a sua identificação num grande desafio.





Um cristal de 'esmeralda' pode ser formado a partir de um berilo quase incolor, contendo perfurações preenchidas por um material cristalino e colado com cimento verde. Nas imitações de esmeraldas, podem ser utilizados revestimentos, chapas metálicas reflexivas incolores ou verdes colocadas no dorso da gema. Esses e outros revestimentos são raros em berilos, mas revestimentos da superfície aparecem, ocasionalmente, em berilos incolores ou pálidos cobertos com revestimento plástico verde. Até um fino filme de carbono, parecido com diamante, foi depositado experimentalmente na superfície de água-marinha e esmeralda.

Berilo, quartzo ou outra substância cristalina qualquer (natural, sintética ou artificial) pode ser tratada, preparada, ou melhor, falsificada, para imitar esmeralda. Para isso, o material é aquecido, fraturado, *crackled*, e tingido, isto é, as fraturas e cavidades distribuídas na superfície da gema são preenchidas por uma substância de cor verde ou tingida de verde.

Impregnações incolores

As impregnações incolores são uma forma de tratamento que se refere à introdução de uma ou mais substâncias incolores (óleos orgânicos ou sintéticos, óleo-resinas ou resinas *epoxy*) dentro de fraturas e cavidades que atingem as superfícies das esmeraldas, para eliminar ou diminuir o contraste óptico dessas inclusões, eliminando-as ou tornando-as menos visíveis.

Elas podem ter dois objetivos: 1) melhorar a transparência e a aparência da gema, sem intensificar ou adicionar cor. Para isso, a substância a ser injetada nessas inclusões deve ser incolor ou quase incolor e ter um índice de refração próximo ao da esmeralda; e 2) proteger a gema, ou seja, as impregnações são realizadas com resinas ou substâncias adesivas, que, além de preencher as fraturas e cavidades superficiais, servem, também, para aumentar o grau de coesão da gema e/ou para estabilizar o tratamento realizado, utilizando endurecedores ou agentes de cura.

Impregnações coloridas

As impregnações coloridas têm como finalidade melhorar a cor e a transparência da gema. Dessa maneira, óleos, ceras, polímeros ou resinas verdes são utilizados para preencher fraturas e cavidades superficiais e, ao mesmo tempo, produzir uma cor mais escura em gemas mais claras, visando melhorar a cor das esmeraldas. Além disso, esses materiais, se incolores, podem ser coloridos de verde por um pigmento (orgânico, inorgânico ou sintético) adequado. É o caso do óleo colorido de verde, comercializado com o nome de *Green Miracle* (Nassau 1994) e de vários outros exemplos de fraturas preenchidas com polímeros (tais como *Opticon*) coloridos de verde, descritos por vários gemólogos.

As impregnações coloridas são utilizadas, também, para produzir imitações em que são utilizadas substâncias verdes ou tingidas de verde, para impregnar uma gema qualquer (natural, sintética ou artificial), mais freqüentemente quartzo e berilo, a fim de torná-la parecida com esmeralda.

Produzir fraturas em gemas, caso ainda não estejam presentes, e impregná-las com óleo colorido é uma técnica comum desde 400 d.C. Assim, berilo de qualidade inferior é convertido em 'esmeralda' pela adição de corantes verdes às substâncias impregnantes convencionais. Em geral, o verde maçã da esmeralda, proveniente de corante artificial, é considerado antiético por muitos comerciantes de gemas, embora seja largamente empregado na Índia, Brasil, etc. Além disso, certos corantes orgânicos aceleram a decomposição química dos impregnantes que têm sido adicionados, comprometendo e colocando em perigo a beleza que eles ajudaram produzir.

Tingimentos

É possível se obter quartzo, berilo, esmeralda, etc. por meio de tingimento. Nesse processo, a cor não está na substância de impregnação, mas depositada nas superfícies das fraturas, poros ou cavidades da gema, devido à evaporação do solvente ou reação química. Esse processo de tratamento usualmente não tem sido distinguido de uma impregnação colorida.

Substâncias utilizadas nas impregnações

Uma grande variedade de substâncias pode ser usada para a impregnação ou preenchimento de fraturas e cavidades em esmeraldas (Tabela 1), portanto, é muito importante distinguir as diferentes características de cada uma.

Tabela 1 Exemplos de substâncias usadas para impregnação de esmeraldas.

Tipo de substância ou material	Índice de refração
Cera de parafina	1,45
Óleo mineral, óleo de milho, óleo de oliva, óleo de amendoim, óleo de soja	1,47
Óleo de rícino, óleo de mamona, óleo de linhaça	1,48
Óleo lubrificante leve	1,49
Óleo de cedro (<i>cedarwood oil</i>)	1,495 - 1,510
Bálsamo do Canadá	1,52 - 1,54 (1,53 - 1,55)
Óleo de palmeira (cocô, dendê) (<i>palm oil</i>)	1,570 - 1,572
Polímeros (<i>epoxies</i>). Ex: opticon	1,5 - 1,6
Berilo, esmeralda	1,58 (1,577 - 1,583)

A permanência e a estabilidade das gemas tratadas por impregnação é variável (Tabela 2), pois alguns tipos de resinas e óleos podem se ressecar, reagir com ácidos orgânicos, ou mesmo serem removidos das fraturas e cavidades, resultando na depreciação da gema. Por isso, deve-se tomar todo o cuidado durante a limpeza, o manuseio e/ou a conservação das gemas assim tratadas.

Os óleos são os mais instáveis porque: a) podem sair quando a gema é aquecida, por exemplo, sob sol forte; b) podem ser removidos, pelo menos parcialmente, por solventes ou numa limpeza com ultra-som ou a vapor; e c) a maior parte pode ressecar com o tempo.

Uma gema composta pode ser facilmente quebrada, se a pessoa não estiver atenta às suas fraturas. No caso do aquecimento da gema, o óleo pode queimar e produzir danos. Com o tempo, alguns óleos, tais como óleos insaturados, reagem com o oxigênio atmosférico e tendem a secar completamente, tornando-se opacos. Limpeza, particularmente com ultra-som, assim como alguns solventes, tais como álcool, éter, acetona, etc. também podem remover o óleo e, inesperadamente, demonstrar os defeitos previamente encobertos.

Diversas substâncias orgânicas no estado líquido, em condições físico-químicas apropriadas, por meio de polimerização, tornam-se sólidas, constituindo-se nos conhecidos polímeros. Existem muitos tipos, com diferentes nomes, tais como resinas, plásticos ou colas que empregam *epoxies*, *poliesters*, acrílicos, etc. A polimerização (colocação e cura) é mais freqüentemente produzida pela adição de um catalisador (endurecedor ou agente de cura); as duas partes podem ser misturadas em quantidades iguais, como em 'duas partes de *epoxies*', ou somente uma pequena quantidade de catalisador pode ser adicionada. Alguns polímeros atingem a cura pela exposição a raio ultravioleta.



Tabela 2

Exemplos de dados comparativos e propriedades das substâncias usadas nos processos mais comuns de impregnação de esmeraldas e que podem ser injetadas com pressão e/ou vácuo.

Tipo de substância	Índice de Refração	Estabilidade evaporativa	Tipo de solvente recomendado	Permanência ou estabilidade do preenchimento
Óleo de cedro	1,495 - 1,510	pobre	álcool éter	Removido por solvente, calor e limpeza com ultra-som. Sensível à luz.
Bálsamo do Canadá	1,52 - 1,54 1,53 - 1,55	boa	éter, aguarrás e álcool	Removido por solvente, calor e limpeza com ultra-som. Sensível à luz e temperatura.
Gematrat	1,534 +/-	excelente	acetona aquecida e álcool isopropílico	Excelente a curto e longo prazo. Estável em limpeza comum ou procedimentos de bancadas.
Opticon	1,545 +/-	excelente	ataque (cloro de metileno - ter cuidado!	Excelente a curto prazo. Torna-se laranja-amarelado a longo prazo. Danos por calor. Limpeza com ultra-som.

Foram feitos vários estudos sobre o preenchimento de fraturas em esmeraldas usando a resina *epoxy* comercializada com a marca *Opticon*, e a impregnação com óleo de cedro e/ou bálsamo do Canadá e várias outras substâncias, ou combinações de substâncias, que estão sendo utilizadas para preencher fraturas e cavidades que atingem a superfície de esmeraldas e outras gemas.

O bálsamo do Canadá e outras resinas podem ser misturados ao óleo de cedro ou outros óleos, como óleo de rícino e de mamona (*castor oil*), côco, milho, linhaça, lubrificante mineral, mocotó bovino (*Neatsfoot*), oliva, óleo de palmeira (côco, dendê) (*palm oil*), amendoim, colza (*rapessed*), soja, tungue (*tung*) e baleia.

Para o tratamento de esmeraldas, existem três tipos básicos de substâncias de preenchimento (Themelis 1997b): a) óleos orgânicos e sintéticos (usualmente óleo de cedro); b) óleo-resinas (mais comumente bálsamo do Canadá); c) resinas *epoxy* sintéticas (polímeros adesivos, quase sempre *Opticon*). Além disso, há um número imenso de combinações de misturas e proporções envolvendo óleos, óleo-resinas e resinas *epoxy* que têm sido aplicadas para produzir os fluidos de preenchimento, cujos resultados variam significativamente e dependem de muitos parâmetros.

No passado, óleos orgânicos, incluindo mamona, rícino, côco, algodão, mineral, dendê, amendoim, oliva, óleo de baleia e outros, ou uma combinação desses óleos foram usados como preenchimentos em esmeraldas. Infelizmente, a maioria deles possui dois pontos negativos, desencorajando o seu uso pelos profissionais experientes. Primeiramente, seus índices de refração são inferiores a 1,50 e, em segundo lugar, suas viscosidades são baixas demais. Enquanto o primeiro tem alguma eficiência nos tratamentos, as últimas influenciam na sua estabilidade e longevidade. Se a viscosidade é baixa demais, o enchimento tenderá a ser deficiente e incorreto. Alguns especialistas preferem preenchimentos fluidos de altas viscosidades que, à temperatura ambiente, são compactos ou densos, viscosos e adesivos em seus estados naturais, mas que podem ser diluídos durante a introdução na esmeralda.

Entre os óleos orgânicos naturais que podem ser utilizados como impregnantes de esmeraldas, o óleo de cedro tem se transformado no favorito, apesar de a qualidade e propriedades físicas poderem apresentar variações de acordo com o fornecedor do produto. Trata-se de um óleo transparente, incolor a levemente amarelo, volátil, um pouco viscoso, insolúvel em água, mas solúvel em éter e álcool puro, sensível a temperatura ambiente normal, e propenso à alteração química por exposição à luz.



O bálsamo do Canadá é outro preenchimento favorito entre os especialistas, não exatamente um óleo, mais propriamente um óleo-resina, extraído da árvore do bálsamo, pinheiro norte-americano. Ele é transparente, amarelado a levemente esverdeado, viscoso, levemente fluorescente, sensível à luz e temperatura, insolúvel em água, completamente solúvel em éter ou aguarrás e, também, somente 90% em álcool.

Óleo de cedro e bálsamo do Canadá são, às vezes, misturados a aproximadamente uma proporção de 3:1 para uso como enchimento de esmeralda. Quando em maior quantidade, o bálsamo do Canadá tem sido misturado com outros óleos como um enchimento impregnante de outras gemas.

Nos últimos anos, resinas *epoxy*, polímeros usados como adesivos, têm competido com óleos tradicionais e óleo-resinas como agente de preenchimento padrão. O mais popular deles é uma resina *epoxy*, comercializada com o nome de *Opticon* No 224, famosa como seladora de fraturas, que tem se tornado favorita dos especialistas, por ser mais estável do que o óleo. A resina *Opticon* é transparente, incolor a âmbar claro, levemente fluorescente e comparável em viscosidade ao bálsamo do Canadá.

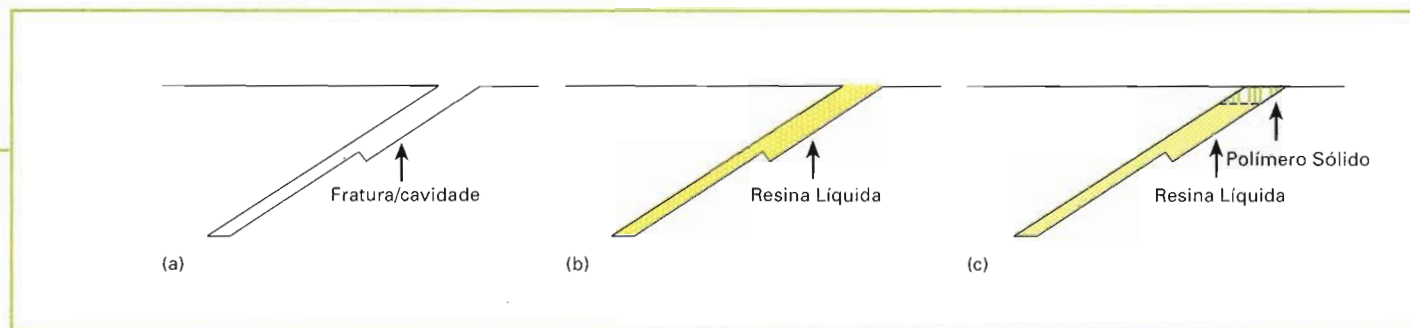
Apesar de suas virtudes, *Opticon* ainda não é um impregnante permanente de esmeralda. A sua vida pode ser estendida pela adição do endurecedor, na proporção de uma parte para dez ou qualquer outra proporção desejável. Entretanto, a remoção do *Opticon* endurecido é muito difícil. Acetonas com base álcool etílico têm sido utilizadas como agentes de limpeza em mecanismos ou sistemas de condensadores químicos, mas somente com sucesso limitado. Além do *Opticon*, outras resinas *epoxy* com características similares são comumente usados pelo mercado, tais como *Araldite NU 471*, *Dobekot 505*, *Novogen P40*, etc. Esses produtos podem ser usados com ou sem endurecedor e, quando a resina *epoxy* é misturada com endurecedor, ela passa por uma solidificação chamada polimerização.

Os Laboratórios Arthur Groom-Gematrat desenvolveram um novo material de preenchimento para esmeraldas: o *Gematrat*, composto por uma resina e um catalisador, isto é, um agente de endurecimento, que pode ser removido com acetona aquecida e álcool é isopropílico. No entanto, suficientemente durável e a esmeralda pode ser relapidada com o preenchimento no lugar. Testes comparativos realizados com *Gematrat* mais catalisador e, com *Opticon* mais catalisador, demonstraram que, em comparação com *Opticon*, o *Gematrat* não se torna amarelo quando guardado e nem com o passar do tempo.

Polímeros podem requerer procedimentos diferentes de cura. Dependendo de como esse processo é realizado, as fraturas podem terminar preenchidas com polímeros solidificados ou preenchidas com a resina líquida contida no lugar por um tampão, *plug*, de polímero solidificado próximo à superfície (Figura 1). Apesar de nele não ser usado um óleo, esse processo ainda é frequentemente chamado de impregnação com óleo, *oiling*.

O preenchimento de fraturas e cavidades em esmeraldas com polímeros incolores, tal como a resina *Opticon*, é um processo que nasceu nos anos 80, do século XX. Esses polímeros são geralmente misturados a um catalisador ou agente endurecedor, resultando em polimerização para dar origem a um sólido plástico, ou seja, as fraturas e cavidades existentes na superfície são preenchidas por uma substância plástica, introduzida na forma líquida, que é, então, endurecida ou curada, por exemplo, pela exposição à luz ou por radiação ultravioleta.

Figura 1. A fratura 'seca' (a) é preenchida com resina líquida (b) e o polímero sólido (resina mais agente endurecedor ou plastificante) sela a fratura (c) (Nassau 1994).





No caso do *Opticon*, a limpeza e remoção de preenchimento antigo são seguidas pela aplicação da própria resina, usualmente com aquecimento a cerca de 90°C e aplicação de vácuo. Em seguida, as gemas são resfriadas à temperatura ambiente e limpas o suficiente para eliminar o excesso da resina. O catalisador ou a mistura da resina mais catalisador é, então, aplicado sobre a superfície da gema e, após uns poucos minutos, o excesso é removido, seguido da limpeza final e polimento.

Vários agentes plastificantes e endurecedores têm sido adicionados às resinas *epoxy* com o objetivo de contribuir para a resistência ou expectativa de vida do preenchimento. Ambos atuam como estabilizadores e selantes do preenchimento. Embora prolonguem a vida dos tratamentos por impregnação, eles não os tornam permanentes, uma vez que, com o tempo, esses agentes perdem a resistência e a durabilidade iniciais e secam por evaporação parcial, criando partículas esbranquiçadas semelhantes a pó dentro das cavidades e, portanto, uma limpeza cuidadosa é requerida, antes que as esmeraldas possam ser reimpregnadas.

Apesar de as características dos impregnantes variar muito, os especialistas em tratamento de esmeraldas restringem as suas escolhas a certos critérios (Themelis 1997b): índice de refração (que deve ser o mais próximo possível do da esmeralda); viscosidade; solubilidade; fluorescência; sensibilidade relativa ao ambiente (luz e temperatura). Nessa escolha, consideram, também, três fatores: 1) preenchimento simples ou múltiplo (tipo e extensão); 2) endurecedor para ser utilizado no processo de impregnação; 3) corante a ser usado no processo de impregnação colorida.

Métodos de Impregnação

O processo de impregnação ou preenchimento de fraturas e cavidades remonta à Grécia e Roma Antigas. As fraturas ou fissuras originadas por tensão mecânica, pressão e/ou temperatura acentuadas, contêm originalmente fluidos (gases e/ou líquidos), e, se tais fraturas ou cavidades alcançam a superfície da gema, elas geralmente estão preenchidas por ar. Os métodos de impregnação têm como princípio substituir o ar que normalmente preenche tais fraturas e cavidades por uma substância transparente, essencialmente incolor, que tenha um índice de refração muito próximo ao da esmeralda e, desse modo, resultar em uma inclusão menos visível, objetivando uma melhoria da aparência e/ou da cor da gema.

A impregnação de esmeraldas com óleo incolor é amplamente aceita no mercado internacional. Entretanto, tal tratamento, assim como aqueles em que se utilizam outras substâncias para preenchimento de fraturas e cavidades em esmeraldas, é feito, usualmente, de maneira empírica ou rudimentar, sem uma metodologia científica adequada, o que ocasiona perdas no rendimento do processo, acarretando prejuízos incalculáveis.

O ideal seria a realização dessa atividade em laboratórios, por meio de metodologias e equipamentos adequados e por pessoal qualificado. Todavia, a escolha, tanto do impregnante como do processo de preenchimento, tem sido feita conforme a região de produção ou por quem está realizando o tratamento. Ainda que certos tratamentos mais simples sejam conhecidos desde a Antiguidade, existem técnicas sofisticadas de impregnação de esmeraldas, resultantes de avanços nos conhecimentos sobre a realização desse melhoramento de maneira mais eficiente.

Consumidores, membros da indústria joalheira e comerciantes de gemas deveriam estar conscientes de que tratamento é uma combinação de arte e ciência. As técnicas de processamento variam de laboratório para laboratório, estendendo-se do primitivo ao altamente sofisticado. Apesar de alguns especialistas restringirem a uma ou duas substâncias de preenchimento, a maioria dos *high-tech treaters* escolhe uma grande seleção de preenchimentos, dependendo do tamanho, configuração das fraturas e cavidades, dos equipamentos disponíveis, e de outros parâmetros. O sucesso do processo de impregnação em esmeralda depende das propriedades do enchimento escolhido e da permanência de tal enchimento. Esmeraldas no estado bruto, formadas, facetadas, lapidadas e cabochões são próprias ou adequadas para o processo de impregnação, desde que tenham fraturas e cavidades alcançando a superfície.

Se algum preenchimento for aplicado à esmeralda anteriormente, é necessário aplicar algum(ns) método(s) de limpeza para remover toda a sujeira e o material do preenchimento residual antes de qualquer outro tratamento. Isso pode ser feito por uma imersão prolongada em solventes e/ou ácidos, possivelmente com a aplicação de ultra-som e/ou vapor, assim como o uso de bomba de vácuo pode extrair o óleo inserido anteriormente. O procedimento de limpeza pode, dependendo do preenchimento a ser usado, levar muitas horas ou mesmo dias.

Para uma boa penetração dentro das fraturas e/ou cavidades, é essencial o uso de um material impregnante com baixa viscosidade. Esse objetivo é alcançado com óleos, parafinas ou resinas levemente aquecidos, usando bomba de vácuo ou aplicando pressão para ajudar a introdução do material de preenchimento nessas inclusões. Aditivos especiais, também, são geralmente empregados para diminuir a viscosidade.

Uma avaliação particular e detalhada da técnica que geralmente é usada na Colômbia foi fornecida por Ringsrud (1983). Segundo ele, as gemas são primeiramente limpas por diversas vezes em fervuras com álcool metílico ou etílico. Por último, é aplicada água régia, ocasionalmente em um recipiente fechado e/ou usando limpeza com ultra-som. Após uma completa enxaguada e secagem, uma variedade de óleos que incluem óleos lubrificantes, óleo de cravo, óleo mineral, óleo de cedro e bálsamo do Canadá é aplicada, freqüentemente com o uso de vácuo, pressão e/ou aquecimento. Um polimento final, às vezes usando vaselina ou cera, completa o processo.

O bálsamo do Canadá tem sido usado com freqüência, particularmente em esmeraldas, podendo ser aplicado vácuo, geralmente combinado com um aquecimento de mais ou menos 100 a 150°C para melhorar a penetração. Embora seja freqüentemente dito que o agente impregnante é despejado sobre as gemas e, em seguida, o vácuo é aplicado, faz muito mais sentido se o vácuo for aplicado primeiro e o óleo, sob vácuo, for introduzido depois. De maneira similar, faz pouco sentido aplicar pressão antes do vácuo para forçar o óleo a penetrar. Se existir ar dentro da fratura, o ar expandirá tão logo a pressão seja liberada; se não houver ar, assim como quando o vácuo é aplicado, a tensão superficial possibilita tudo o que é necessário para preencher a fratura completamente.

Basicamente, a impregnação é um processo desenvolvido em três etapas básicas: a) remoção do ar e gás(es) das cavidades da gema em uma câmara de vácuo; b) indução ou introdução da substância de preenchimento aplicando alta pressão; c) limpeza final e enceramento ou polimento, em que cera ou vaselina é aplicada à superfície com um tecido macio ou camurça para dar à gema o seu acabamento final e brilho.

Equipamentos de impregnação

Em 1992, foi apresentado, em Tucson (EUA), o kit *Green Miracle* (Koivula *et al.* 1992), destinado ao tratamento de esmeraldas pelo método de impregnação colorida, utilizando um corante verde base óleo e calor, sem a utilização de pressão ou vácuo.

Existem outros dispositivos para melhorar a aparência de esmeraldas. Um deles é o *Lubri Gem* (Koivula *et al.* 1993), desenvolvido por Zvi Domb, engenheiro da Ramat-Hasharon (Israel). Dispositivo disponível em três tamanhos: um maior, que permite impregnar cerca de 1000 gemas ao mesmo tempo; uma unidade média, para 400 gemas, e uma menor, para 50 gemas. Todas essas unidades permitem a utilização de aquecimento a aproximadamente 95-100°C e podem ser usadas acopladas a uma bomba de vácuo.

Um outro fabricante israelense, Colgem-Zamrot of Ramat Gan, oferece dois dispositivos movidos eletricamente (Koivula *et al.* 1994), destinados a preencher fraturas em esmeraldas e outras gemas coradas. A unidade maior, denominada *VPO - Vacuum and Pressure Oiling System*, pode tratar milhares de gemas em poucas horas e com qualquer série de substâncias de preenchimento, incluindo óleos e resinas, naturais e sintéticos. É formada, basicamente, por dois compartimentos. No primeiro, as gemas são aquecidas sob vácuo para remover ar e umidade das fraturas, e, no segundo, a substância de preenchimento é aquecida para reduzir a viscosidade antes que ela seja transferida para o compartimento com as gemas preparadas. Para ajudar o material de preenchimento penetrar nas gemas, o primeiro compartimento pode ser pressurizado acima de oito atmosferas.

A outra unidade, *Mini Oiler*, tem um compartimento simples aquecido eletricamente. A bomba operada manualmente cria o vácuo no qual as gemas são primeiramente aquecidas em um pequeno cesto no topo do compartimento fechado, sendo mantidas lá por um engenhoso sistema de ímã, enquanto o material de preenchimento é aquecido abaixo. A liberação do magneto origina a queda do cesto cheio de gemas dentro do impregnante aquecido. A bomba pode, então, ser utilizada para pressurizar o compartimento. Compartimentos com impregnantes adicionais são utilizáveis para ambos os sistemas, para permitir a rápida substituição de diferentes tipos de enchimentos.

Uma terceira unidade, a *Rotary Cleaning Machine* (Koivula *et al.* 1994), destina-se a uma aplicação específica: limpeza e polimento com couro ou camurça de gemas, após o preenchimento de fraturas e/ou cavidades. Usando um movimento circular, a



máquina limpa as gemas por cerca de 30 segundos, com tecido macio. Os tecidos são, então, substituídos por uma pele de animal, para uns 30 segundos de polimento com couro. Esse sistema pode limpar milhares de gemas por hora.

O Sistema de Preenchimento de Fraturas, *Fracture Infill Apparatus - FIA*, do GEMLAB INC Gemstone Enhancement, Services & Equipment de Atenas (Grécia) (Themelis 1997a), é um sistema eletromecânico usado para limpar (Módulo de Limpeza) e/ou preencher fraturas e cavidades (Módulo de Impregnação) existentes em esmeraldas com várias substâncias fluidas. O *FIA* foi projetado por Ted Themelis e construído no laboratório da GEMLAB, para aplicações de rotina, sem levar em consideração o tamanho, orientação e configuração das fraturas e cavidades das gemas.

O Módulo de Limpeza é usado para remover várias substâncias de preenchimento previamente injetadas dentro da esmeralda. O módulo é formado por um pistão hidráulico incorporado a um sistema ou dispositivo de aquecimento e controlador de temperatura, que se movimenta em deslocamentos com cronometragem pré-programáveis, criando pressões para 3,000 psig. O processo de limpeza pode ser executado automaticamente durante dias, sem requerer ou exigir assistência de operador. Pressão e temperatura diferenciadas originam as condições ideais de limpeza, produzindo notáveis e importantes resultados sem danificar as esmeraldas.

O Módulo de Impregnação realiza duas funções: a) remove o ar trapeado nas fraturas e/ou cavidades das esmeraldas, em várias partes mecânicas e no agente de impregnação (óleo, etc.); b) produz pressão de equilíbrio de 3,000 psig, forçando o preenchimento a ser injetado dentro das fraturas e cavidades das esmeraldas, sem a introdução de ar durante o processo de troca ou mudança (do vácuo para pressão). O módulo de impregnação consiste de uma bomba de alto-vácuo, êmbolo ou pistão hidráulico mecânico, mecanismo de pressão com pistão de acionamento ou transmissão auto-regulável, cápsula de processamento com mecanismo de aquecimento, recipiente do agente de impregnação com aquecedor, microprocessador do controlador de temperatura com sensor par termoeletrônico, indicadores de medidas (pressão, vácuo), mangueiras ou tubos de conexão, etc.

Identificação dos tratamentos ou preenchimentos

Com a proliferação de processos e substâncias, a identificação dos tratamentos ou preenchimentos tornou-se difícil. Em adição, existe uma considerável questão no mercado em relação à durabilidade dos diferentes materiais, *fillers*, e processos de preenchimentos. Por causa das várias durabilidades reivindicadas, joalheiros e gemólogos estão tentando relatar vários aspectos, como por exemplo, *flash effects* - irisação ou lampejos coloridos, para processos específicos.

Embora o preenchimento de fraturas e cavidades superficiais de esmeraldas seja praticado de várias formas há tempos, pesquisas recentes têm resultado no desenvolvimento de novos materiais de preenchimento e melhoramentos nas técnicas de impregnação. Identificar preenchimentos específicos é difícil e consome tempo, e detectar a presença de um impregnante, muitas vezes, é mais importante do que conhecer a sua composição. Todos os preenchimentos de esmeraldas têm um índice de refração muito próximo ao da esmeralda, logo as fraturas e cavidades de gemas tratadas tornam-se menos visíveis. Por outro lado, como os procedimentos de impregnação nunca são perfeitos, essas falhas tornam-se possíveis de serem detectadas por meio de um microscópio.

Quando um ou mais impregnantes encontram-se misturados, com ou sem endurecedor adicionado para compor o fluido final de preenchimento, a identificação precisa de tais ingredientes presentes nas fraturas e cavidades de uma esmeralda é extremamente difícil e não pode ser conseguida com equipamentos gemológicos convencionais. Além disso, é impossível determinar quando o agente ou fluido impregnante foi introduzido dentro dessas inclusões da esmeralda. A determinação desses enchimentos pode ser realizada com o uso de técnicas de espectrofotometria, empregando equipamentos sofisticados, incompatíveis para gemólogos comuns.

A identificação começa com testes gemológicos convencionais para a determinação de berilo e de esmeralda, e exclusão da possibilidade de a esmeralda ser sintética. Geralmente um gemólogo experiente pode identificar se uma esmeralda está ou não impregnada, o que é conseguido por meio da observação das inclusões existentes nas ou próximas às fendas ou fraturas e cavidades. Para isso, usa-se um microscópio equipado com iluminação campo escuro e uma unidade de fibra óptica. Alguns agentes de preenchimento secam em determinadas posições das cavidades das esmeraldas, formando minúsculos pontos brancos, com aparência e configuração características. Outros preenchimentos aparecem como descolorado ou desbotado, queimados, especialmente quando o aquecimento foi incorporado durante o processo de impregnação.



Na prática, a identificação do material de preenchimento não pode ser determinada sem um método potencialmente destrutivo, como por exemplo, remover alguma parte da(s) substância(s) do preenchimento de uma gema para análises químicas sem o risco de danificá-la. A situação fica mais complicada ainda, por exemplo, pelas considerações a seguir. Primeiro, as propriedades gemológicas das várias substâncias de preenchimento podem ser coincidentes ou sobrepostas. Segundo, tem sido reportado que misturas materiais de preenchimento são ocasionalmente usadas, incluindo substâncias naturais ou sintéticas. Terceiro, óleos coloridos ou outros materiais estranhos, que afetam a cor aparente de uma gema, são detectados nas fraturas.

Atenção especial deverá ser dedicada à distinção entre cores naturais e as produzidas artificialmente. Em qualquer caso, o estudo da cor em minerais-gemas fornece-nos uma riqueza do entendimento sobre as suas propriedades físicas e químicas. Tais estudos também estabelecem as bases científicas para as tecnologias que irão ser usadas no futuro, para a caracterização de materiais geológicos, bem como de suas modificações. Assim, as técnicas dos pesquisadores crescem em sofisticação e os gemólogos devem aprimorar o seu aperfeiçoamento em sofisticação tecnológica lado a lado com as tecnologias que vêm sendo usadas tanto em manipulação como em caracterização de materiais gemológicos.

Dependendo do pigmento usado, a impregnação com óleo colorido pode desbotar com o tempo, além de sofrer outros efeitos. Felizmente, a impregnação com óleo colorido pode ser relativamente fácil de ser detectada, se o material for imerso em um fluido de índice de refração próximo ao da gema, o que revela a localização da cor concentrada nas fraturas. Esfregar com tecido de algodão ou papel branco mergulhado em um solvente orgânico forte pode, também, revelar o corante.

Crítérios para distinguir substâncias de preenchimento em esmeraldas foram investigados por Johnson *et al.* (1999). Trinta e nove tipos de substâncias de preenchimento foram divididos em seis categorias: três *presumed natural*, formadas por óleos essenciais - incluindo óleo de cedro, outros óleos, e graxas; e três resinas artificiais - pré-polímeros *epoxy*, outros pré-polímeros, incluindo *UV setting adhesives*, polímeros. Indiferentemente de suas composições, substâncias de preenchimento com índices de refração de 1,54 ou superior mostram *flash effects* em esmeraldas. Por meio da espectroscopia Raman e no infravermelho (*FTIR*), as substâncias de preenchimento podem ser separadas em cinco grupos espectrais A, B, C, D e E. A maioria resinas artificiais comumente usadas, mas não todas, têm espectros distintos dos de óleo de cedro.

Inúmeras razões têm sido dadas a favor da necessidade de se determinar a natureza de um material particular de preenchimento. Além disso, devido à variedade das condições de crescimento, esmeraldas de diferentes localidades podem não corresponder similarmente a um mesmo preenchimento. Por último, culturas ou costumes diferentes podem decidir que algumas substâncias de preenchimento são mais aceitáveis que outras. É preciso avaliar criticamente a eficiência dos vários métodos usados, para definir as características distintivas entre as substâncias de melhoramento da transparência e, os principais métodos, geralmente em uso, envolvem o estudo dos *flash effects* (Kammerling *et al.* 1991, Johnson *et al.* 1999 e outros), microespectrometria *Raman* e espectroscopia infravermelho (Kammerling *et al.* 1991, Kammerling & Fryer 1995, Hänni *et al.* 1997, Themelis 1997b, Hänni 1999, Johnson *et al.* 1999, Johnson & Muhlmeister 1999, Kiefert *et al.* 1999, dentre outros).'

Divulgação dos melhoramentos, tratamentos ou tipos de preenchimentos

No caso específico de esmeralda, alguns comerciantes consideram, separadamente, a impregnação com óleo como óbvia e geralmente aceita por todos, e a impregnação com resinas, não tão largamente aceita. Na realidade, qualquer tipo de preenchimento deveria ser revelado. Esse tipo de problema está sendo remetido a vários encontros de associações internacionais e de pessoas ligadas ao comércio de gemas, e qualquer opinião a respeito continuará a ser matéria para discussão, até que uma posição sólida seja tomada. O consumidor tem o direito de receber todo tipo de informação a respeito da gema ou jóia que está à venda e, com base nisso, decidir pela compra ou não daquele material. Na prática, geralmente, isso não acontece e muitos clientes pensam que, na hora da compra, estão sendo informados sobre todos os aspectos importantes. Em relação a todas as gemas preenchidas, não importa que tipo de preenchimento foi empregado, tal fato deveria ser abertamente revelado aos consumidores, a fim de que eles pudessem decidir em relação à compra e, principalmente, sobre o manuseio correto e a conservação adequada daquela gema ou jóia que está adquirindo.

Três aspectos principais foram trazidos à tona no final do século XX: 1) Que tipos de preenchimentos (*fillers*) foram empregados; 2) Qual é a permanência ou durabilidade de cada substância de preenchimento utilizada; e 3) Quanto(s) preenchimento(s) está(ão) presente(s) em uma dada gema. A grande questão é, por exemplo, se uma esmeralda com fraturas preenchidas por óleo pode ser chamada de 'natural', enquanto uma outra impregnada por resina *epoxy* deve ser identificada como 'tratada'. Se for dessa maneira, como então fazer a classificação de uma gema tratado com óleo de linhaça que esteja seco ou ressequido, isto é, polimerizado?

Os especialistas em tratamento, *treaters*, começaram a usar resinas *epoxy* endurecidas, utilizando agentes endurecedores ou plastificantes, com a idéia de que elas poderiam ser mais duráveis do que as substâncias líquidas, que tendem a vaziar ou escapar com o tempo, ou após o tempo estipulado. A durabilidade individual ou particular das substâncias de preenchimento continua a ser objeto de investigação. Entretanto, aqueles que usam outros preenchimentos têm feito várias reivindicações referentes às capacidades de tais gemas tratadas se manterem, ou de se sustentarem, dentro das condições normais de uso e cuidado.

Um desfecho ou progresso durante esse debate foi quando muitos da indústria alegaram que uma característica desejável de um preenchimento poderia ser a sua capacidade em permitir a sua remoção, porque algumas resinas desintegram-se, tornando-se brancas, esbranquiçadas ou manchadas com o tempo. Os comerciantes reconheceram que os preenchimentos eventualmente precisariam ser removidos e, por isso, as gemas ou gemas poderiam ser re-tratadas. Essa era uma referência convincente, mas igualmente o que atenta contra eliminar esses preenchimentos instáveis é o fato de que esse tipo de procedimento, muitas vezes, tem sido malsucedido.

Também durante o final do século XX, determinados laboratórios mantiveram a tese de que poderiam, confortavelmente, fazer a distinção entre os diferentes tipos específicos de preenchimentos e, dessa maneira, começaram a oferecer um tipo de serviço a esse respeito. Outros acreditam que, enquanto esses preenchimentos podem ser separados em categorias gerais, isso pode ser dificultoso ou igualmente impossível para identificar preenchimentos misturados ou gemas que tenham sido tratadas múltiplas vezes e/ou com diferentes substâncias de preenchimento.

A maioria das organizações do mercado de gemas coradas, tais como International Colored Gemstone Association (ICA), American Gem Trade Association (AGTA) e Confederation of Jewellery, Silverware, Diamonds, Pearls and Stones (CIBJO), recomendam que tratamento de gemas sejam revelados em todos os estágios do processo de distribuição. Entretanto, o comércio continua a debater o que exatamente deveria ser divulgado e como isso deveria ser feito.

Em particular, as esmeraldas são menos vendáveis em alguns mercados, se elas forem distinguidas por conter algumas substâncias, tais como, a resina *epoxy Opticon* perante outros, como o *cedarwood oil*. Entretanto, uma proposta para distinguir *oiling* de enhancement (melhoramento) com resinas *epoxy* foi considerada pelos membros da ICA, em 1995, como impraticável ou inexecutável. Em 1997, a ICA decidiu adiar uma decisão a esse respeito em relação à esmeralda, por não ter chegado a um consenso.

Sob o ponto de vista químico, preencher uma fissura com qualquer substância nova, seja ela óleo ou resina, na verdade, não introduz 'alguma coisa' *dentro* do material gemológico, ou seja, esse tratamento coloca alguma(s) substância(s) para preencher(em) espaços ocupados pelas fissuras. Independente da composição química da substância usada, tal ação é um tratamento de gema que visa alterar a sua aparência natural e, conseqüentemente, por uma questão de honestidade e integridade, exige que a sua revelação seja feita.

A impregnação com óleo, *oiling*, tem sido implicitamente aceita por todo o mercado ao redor do mundo. Desde que impregnação com resinas sintéticas é considerada uma extensão da impregnação com óleo, todas as esmeraldas impregnadas com substância(s) incolor(es), óleo ou resina sintética, deveriam ser consideradas como esmeraldas naturais. Entretanto, toda informação, incluindo a presença de óleo ou resina, deve ser informada ao consumidor.

Impregnação com óleo é um tratamento ou melhoramento de esmeralda quase universal, mas desconhecido do público. Não é permanente e deveria ser repetida em intervalos de tempo, periodicamente. Uma esmeralda pode se beneficiar de impregnação somente se as fraturas, cavidades ou fissuras alcancem a superfície. O óleo usualmente evapora no período de 2 a 5 anos. A impregnação de esmeraldas com óleo, para mascarar ou encobrir inclusões naturais, é freqüentemente muito efetiva e certamente rotineira, mas, via de regra, o consumidor não imagina que suas esmeraldas são tratadas porque o comércio não revela a prática ou nega completamente o fato de ela ser muito comum.

O tratamento de esmeraldas para encobrir defeitos (fraturas e/ou cavidades) vem sendo realizado há mais de 2000 anos. Toda esmeralda requer um tratamento para eliminar, ou pelo menos minimizar, o efeito negativo que as fraturas ou cavidades superficiais promovem na aparência global da gema. Esmeraldas livres de inclusões, ou melhor com poucas inclusões, são extremamente raras,

logo o tratamento por impregnação de esmeraldas é rotineiro e necessário.

As normas da CIBJO (1995) exigem que informações gerais sobre rotinas de tratamentos ou melhoramentos de gemas sejam incluídas nos documentos comerciais em todos os níveis do mercado, dos produtores aos consumidores.

Um sistema de códigos proposto pelos membros da ICA (1997), classifica todas as esmeraldas submetidas a processos de tratamento ou de melhoramento, *enhancement*, em quatro categorias: 1) N = esmeraldas não melhoradas e não tratadas. 2) O = esmeraldas impregnadas com óleo ou material 'oleoso' incolor. 3) E = esmeraldas melhoradas por processos aceitos pelo mercado, ou seja, impregnação com resinas naturais, tipo bálsamo do Canadá, assim como resina *epoxy* sintética, tipo *Opticon*, sem endurecedor ou estabilizador. 4) T = esmeraldas tratadas por outros processos, ou seja, impregnadas com óleo verde ou tingido de verde, resinas *epoxies* endurecidas, polímeros ou substâncias coloridas de qualquer tipo.

Classificação e avaliação qualitativa dos preenchimentos

Muitos têm proposto que a quantidade de preenchimento em uma certa esmeralda é, talvez, mais importante do que identificar o tipo de preenchimento utilizado e, conseqüentemente, muitos laboratórios passaram a oferecer um certo tipo de serviço que classifica o grau do melhoramento, tais como, *none, minor, moderate e significant*. De outra forma, numa avaliação qualitativa, a mais comum, se uma quantidade minúscula ou insignificante de uma substância estranha pode ser detectada, mas se é determinado que isso não afeta significativamente a aparência da gema, o laudo ou registro poderia ser *no evidence of clarity enhancement was detected*, ou seja, nenhuma evidência de melhoramento na transparência ou diafaneidade foi detectado. Mas, se o melhoramento foi significativo, o texto passaria a ser, por exemplo, *evidence of clarity enhancement is present*, isto é, evidência de melhoramento na transparência ou diafaneidade está presente.

Seguindo essa linha de trabalho, teríamos outros exemplos de textos que são utilizados pelos laboratórios de gemologia espalhados pelo mundo: 1) *no indication of fracture filling*, sem indicação de preenchimento de fraturas, ou *no evidence of clarity enhancement*, sem evidência de melhoramento na transparência ou diafaneidade; 2) *evidence of clarity enhancement*, evidência de melhoramento na transparência ou diafaneidade; 3) *evidence of color and clarity enhancement is present*, evidências de melhoramento da cor e da transparência ou diafaneidade estão presentes; e, 4) *no coment*, sem comentário.

Caracterização do grau de melhoramento da transparência ou diafaneidade

Técnicos do Gemological Institute of America (GIA) e do GIA, Gem Trade Laboratory (GTL), têm feito um estudo amplo dos preenchimentos utilizados em esmeraldas. Essas pesquisas concentram-se em três áreas principais: 1) determinação do tipo específico de impregnante utilizado em uma esmeralda; 2) determinação da extensão do grau em que uma esmeralda foi preenchida; e 3) investigação do efeito produzido pelos diferentes preenchimentos, além do tempo estipulado e para as condições normais de uso, cuidado e produção de jóias - *manufacturing*.

Um dos maiores interesses em relação ao preenchimento de esmeralda consiste na definição do grau de melhoramento da transparência ou diafaneidade (*degree of clarity enhancement*) e, com esse dado, determinar o que representa o tratamento aplicado. Gemas que parecem ter excelente transparência a olho nu, muitas vezes, escondem ou disfarçam um extensivo trabalho de preenchimento de fraturas. Assim, utilizando, como estrutura base, o sistema do GIA para graduação da transparência em diamantes, técnicos do GIA e do GTL definiram uma metodologia para estabelecer o tamanho, o número e a posição das fraturas preenchidas em uma esmeralda e, sobre essa base, classificar o grau aparente do melhoramento alcançado na transparência ou diafaneidade da gema.





Os critérios para definir esses graus de melhoramento na transparência foram os seguintes (McClure *et al.* 1999): 1) a presença de fraturas e cavidades (inclusões) preenchidas que poderiam ser classificadas no intervalo VVS₂ a VS₂ do sistema de graduação da transparência em diamante. Isto é, quanto ao tamanho e à extensão das fraturas preenchidas em relação ao tamanho da gema e as suas localizações na gema, foi considerado um *minor enhancement* - melhoramento pequeno, secundário ou sem importância; 2) esmeraldas com fissuras ou fraturas preenchidas correspondentes ao intervalo SI₁ - SI₂ foram classificadas como *moderately enhanced* - moderadamente melhoradas; e, 3) aquelas que poderiam ser classificadas em I₁ e abaixo foram classificadas como *significantly enhanced* - significativamente melhoradas.

A categoria *minor* reflete o caso em que o *clarity enhancement* teve somente um diminuto ou insignificante efeito na aparência da faceta superior ou mesa da gema. A categoria *moderate* indica que as fissuras presentes apresentam um notável ou visível efeito, mas não extremo, na aparência da face superior (mesa) das esmeraldas. A categoria *significant* revela que o melhoramento da transparência teve um efeito óbvio ou evidente na aparência das esmeraldas.

Localização e medição de fraturas preenchidas

Os especialistas do GIA utilizam um microscópio gemológico (com aumento variando de 10 a 25X) e iluminação campo escuro para determinar o tamanho, a extensão e a localização das fraturas ou cavidades. O procedimento usado requer que o gemólogo primeiro examine a faceta superior da gema (através da faceta da mesa e pinças segurando a cintura da gema), e, em seguida, através dos lados (facetas da coroa e do pavilhão) e culaça, com pinças segurando a faceta da mesa e a culaça.

O gemólogo, cuidadosamente, observa a gema em todas as direções para avaliar a profundidade das fraturas ou cavidades e a quantidade de preenchimento presente. Uma iluminação de fibra óptica pode ser útil para estabelecer a extensão total da fratura ou cavidade, que pode não ser visível com a iluminação em campo escuro. Uma fonte de luz colocada acima da cabeça é utilizada para examinar as facetas em luz refletida e será útil na determinação da extensão da fratura e o seu alcance em relação à superfície, uma vez que há dificuldades para esse tipo de observação em uma gema com fraturas ou cavidades bem preenchidas.

Uma vez localizadas as fraturas ou cavidades que atingem a superfície e determinado que elas foram preenchidas ou parcialmente preenchidas, os especialistas têm condições de classificar o grau do melhoramento aparente, de acordo com uma combinação do tamanho (comprimento), extensão (profundidade), número, localização das fraturas ou cavidades e a quantidade de preenchimento presente nelas. A quantidade de preenchimento presente nessas inclusões é estabelecida microscopicamente com iluminação suplementar de fibra óptica. Para algumas esmeraldas, a fluorescência ultravioleta característica - um teste padrão em identificação de esmeraldas - pode também revelar a localização, o tamanho e a extensão das inclusões preenchidas.

Visando investigar o grau de preenchimento de fraturas e cavidades em esmeraldas e, como consequência, avaliar a eficiência do método de impregnação, Polli (1999) desenvolveu parte dos seus trabalhos, procurando estabelecer uma avaliação qualitativa e quantitativa do preenchimento, utilizando, para isso, os Sistemas de Análise e Processamento de Imagens *Quantimet Leica Q600S* e amostras da Mina da Belmont. Da mesma forma, com base nos resultados obtidos, esse assunto foi abordado parcialmente por Polli *et al.* (2000a,b) e, de forma mais ampla, neste capítulo.

Para atingir esse objetivo, foram utilizados os seguintes métodos:

Microscopia óptica

Inicialmente, as amostras foram analisadas por meio de lupas binoculares e microscópios gemológicos e petrográfico, o que possibilitou selecionar as amostras para o preenchimento de fraturas e cavidades superficiais. Após escolha das amostras de maior significado para os estudos propostos, foi feita cuidadosa análise com auxílio de microscópios petrográfico e gemológicos, por intermédio dos quais, com aumentos variáveis, foi possível realizar mapeamentos de fraturas e cavidades, antes e depois de submetidas a tratamento.

L i m p e z a d a s a m o s t r a s

Como as amostras recebidas já estavam impregnadas com óleo e, principalmente, visando testar metodologias de limpeza de esmeraldas, foram realizados diversos ensaios com detergentes ou solventes (hidróxido de sódio, álcool, acetona, *thinner*) e ácidos (clorídrico, nítrico, água régia), a quente e a frio, para limpar amostras de esmeraldas. Tais experiências permitiram obter resultados conclusivos em relação à utilização adequada e à eficiência de cada um deles, não só para a limpeza de esmeraldas tratadas ou não, mas também em relação à remoção de substâncias ou resíduos incorporados às fraturas e/ou cavidades superficiais, durante as etapas de preparação das amostras.

I d e n t i f i c a ç ã o e c l a s s i f i c a ç ã o d a s a m o s t r a s

A identificação das amostras foi realizada por amostragem, com o auxílio de refratômetro, para determinação dos índices de refração; dicroscópios de polaróide ou de calcita, para determinação de pleocroísmo; e classificação, para estudo de inclusões, foi desenvolvida utilizando-se de microscopia óptica. Após a identificação, as amostras foram classificadas e agrupadas em conjuntos com características comuns de diafanidade e de tamanho. Como as amostras apresentavam praticamente a mesma tonalidade de verde, não foram diferenciadas em relação à cor.

P r e p a r a ç ã o d a s a m o s t r a s

Nessa etapa, inicialmente, as amostras selecionadas foram serradas ou transformadas em placas com cerca de 1,5 a 3mm de espessura e, com o Equipamento de Lapidação Rossi, foi possível: a) facetar as 'duas faces verticais', que formaram a origem ou ponto de referência para as análises e processamentos de imagens no *Quantimet*; b) facetar as 'duas faces paralelas horizontais' geradas com a serra e c) polir essas 'duas faces paralelas'. Essas operações foram realizadas manualmente, ou seja, em nenhuma delas foi possível fixar as amostras em suportes ou 'canetas' de lapidação, para não impregnar fraturas e/ou cavidades superficiais, para mantê-las livres de resinas, colas ou adesivos e, conseqüentemente, facilitar ou possibilitar a posterior introdução do preenchimento escolhido.

O polimento das 'duas faces paralelas' foi obtido, também, e com resultados melhores, por meio de produtos, equipamentos e sistemas de polimento de lâminas delgadas ou de seções polidas. Inicialmente, as superfícies foram polidas com Abrasivo 1000 (*Carborundum 9 1/4* ou carbeto de silício, dureza 9,5) colocado sobre uma placa de vidro com um pouco de água, mais movimentação manual em círculos. Para o polimento final, foi utilizada uma Politriz e como abrasivo a *AP-Paste Alumina AP-F Code APFIN*, da Struers.

Todas as operações de limpeza de fraturas e cavidades superficiais das amostras, ou seja, a remoção dos materiais e substâncias de polimento ou resíduos das etapas de corte e facetamento existentes nessas inclusões, foram feitas com ácidos (clorídrico, nítrico, água régia) ou solventes (hidróxido de sódio, álcool, acetona, *thinner*), a quente e a frio, conforme era necessário.

A n á l i s e e p r o c e s s a m e n t o d e i m a g e n s

Além do estudo óptico das amostras de esmeralda em lupa binocular e microscópios gemológicos e petrográfico, foram utilizados, exaustivamente, os Sistemas de Análise e Processamento de Imagens *Quantimet Leica Q600S*, acoplados a microscópio petrográfico, câmara de vídeo colorida e máquina fotográfica, para o estudo das fraturas e cavidades com aberturas na superfície antes e depois de submetidas a tratamento.

Impregnação das amostras

Foram selecionados e preparados conjuntos de amostras, compostos de placas ou de fragmentos de esmeralda no estado bruto, de acordo com os objetivos, ou seja, realizar impregnações utilizando diferentes tipos de preenchimentos (óleo mineral incolor, óleo de cedro, *Opticon* e *Opticon* mais corante) com ou sem a utilização de bomba de vácuo.

Todas as impregnações foram feitas no Centro de Tecnologia de Gemas (CTG) do DEGEO, utilizando-se de um sistema de impregnação de gemas que consiste basicamente de três partes: a) uma bomba de vácuo; b) um recipiente de impregnação (dessecador); e c) um dispositivo de aquecimento para amostras e/ou líquidos ('secador de areia' com lâmpada incandescente de 150W). Os dois primeiros são interligados por meio de mangueiras de plástico transparente, cujos fluxos de ar são controlados por um registro de 4 entradas ou saídas, que permite e controla o desenvolvimento das seções de vácuo no compartimento de impregnação. As amostras e/ou líquidos foram introduzidos no sistema por meio de placas de Petri ou cadinhos de porcelana.

Em qualquer processo de impregnação, para a obtenção de melhores resultados, as fraturas e cavidades com aberturas na superfície devem estar satisfatoriamente limpas e livres de umidade. Logo, o manuseio das amostras já preparadas para impregnação deve ser feito, por exemplo, com pinças, evitando-se contatos entre as amostras e as mãos ou dedos.

A metodologia básica para as impregnações de esmeraldas da Mina da Belmont, desenvolvida por Polli (1999) tem 19 ou 20 etapas e tem por base, em especial, Ringsrud (1983), Kammerling *et al.* (1991), Nassau (1994) e Themelis (1997b). As etapas dessa metodologia são:

a) Antes da impregnação: 1) Limpeza das amostras; 2) Identificação, classificação e seleção das amostras (microscopia óptica); 3) Preparação das amostras e remoção de resíduos das fases de corte, facetamento e/ou polimento; 4) Mapeamento e quantificação de inclusões; 5) Fotos micro e macroscópicas de inclusões, previamente escolhidas ou por amostragem; 6) Limpeza da 'gordura' de manuseio; 7) Pesagem das amostras.

b) Impregnação das amostras: 8) Aquecimento das amostras ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), durante aproximadamente duas horas; 9) Aquecimento do óleo ou do *Opticon* ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), durante aproximadamente 30 min a 1 hora; 10) Aplicação de vácuo; 11) Impregnação das amostras com a substância impregnante; 12) Aplicação de vácuo; 13) Repouso (mais ou menos 24 h); 14) Limpeza das amostras e acabamento final; 15) Diagnóstico da impregnação (por amostragem, através de lupa binocular); 16) Opcional - Aplicação de estabilizante ou de endurecedor (amostras impregnadas com *Opticon* e *Opticon* mais corante);

c) Depois da impregnação (quantificação das impregnações): 17) Pesagem das amostras; 18) Mapeamento e quantificação de inclusões da etapa 4; 19) Fotos micro e macroscópicas de inclusões da etapa 5; 20) Tratamento dos dados, análise dos resultados e conclusões.

Quantificação dos Preenchimentos

A quantificação das impregnações das amostras foi realizada por meio de comparações, qualitativas e quantitativas, dos dados obtidos, respectivamente, antes e depois dos preenchimentos de fraturas e cavidades superficiais. E pode ser executada de cinco maneiras: 1) Microscopia óptica e/ou análise visual das amostras e interpretação qualitativa da impregnação. 2) Análise visual e interpretação qualitativa de macro e microfotos registradas por máquinas fotográficas. 3) Análise visual e interpretação qualitativa de imagens geradas pelo *Quantimet Leica Q600S*. 4) Análise e interpretação dos pesos obtidos em balanças de precisão. 5) Principalmente, a partir dos dados quantitativos provenientes das imagens geradas, analisadas e processadas pelo *Quantimet Leica Q600S*. Por meio desse sistema, foram obtidos dados ou parâmetros, selecionados livremente a partir de uma lista disponível, relacionados tanto a conjuntos de inclusões ou áreas específicas de amostras (denominadas *field*) quanto a cada uma das inclusões mapeadas (*features*) nessas áreas.

As informações obtidas por intermédio dos itens a, b e c foram úteis apenas para o caso da quantificação qualitativa da impregnação. Para isso, bastava a comparação visual de imagens e/ou fotos geradas, respectivamente, antes e depois da impregnação. Nas pesagens, item d, na maioria das vezes, as diferenças entre os pesos obtidos em balanças de precisão, respectivamente, antes e depois das impregnações, foram insignificantes. Sendo assim, apesar de realizadas com as recomendações necessárias, as pesagens, pelos resultados apresentados, demonstraram ser pouco eficientes para o processo de quantificação da eficiência das impregnações.

Do ponto de vista quantitativo, os dados obtidos por meio do item e foram de longe os mais recomendados, primeiramente, porque são dados quantitativos de inclusões (fraturas, cavidades, etc.) e, em segundo lugar, devido à variedade de elementos ou parâmetros que podem ser mensurados.

Os parâmetros medidos, as calibrações adequadas e necessárias entre os diferentes equipamentos, enfim, todos os procedimentos adotados durante os mapeamentos das inclusões foram sempre os mesmos, visando manter os padrões invariáveis e poder realizar comparações compatíveis entre resultados obtidos tanto em amostras com impregnações iguais como diferentes. Por exemplo, foram utilizadas oculares de 25X, objetiva de 5X e luz transmitida no microscópio petrográfico. Com uma objetiva de 5X no microscópio, a unidade de medida do *Quantimet Leica Q600S* (1 pixel) passa a ser de 1,98 μm (0,00198 mm) e assim por diante.

Em todas as impregnações realizadas em amostras lapidadas com duas faces polidas, foram selecionadas amostras para o mapeamento de inclusões e, para cada uma delas, em ambas as faces polidas, foram escolhidas e mapeadas determinadas *áreas de medidas* (que passaram a ser denominadas amostras) contendo inclusões, gerando imagens e dados, respectivamente, antes e depois da impregnação da amostra. Esse mapeamento tem que ser feito de tal maneira que o posicionamento da amostra ou *área de medida*, antes e

Tabela 3

Exemplos de dados MFD (*measure field*) obtidos antes e depois da impregnação das amostras com opticon incolor e utilizando bomba de vácuo.

Amostras	Área (μm^2)		Perímetro (μm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois
21F1	337042,78	318626,56	38228,23	37688,55
21F2	337743,53	312768,66	32521,88	28140,92
21F3	344577,78	289033,88	34129,02	27752,03
21F4	329901,50	282853,13	53204,45	40543,71
21F5	258653,80	186902,19	37970,3	26589,33
25V1	454098,78	393988,19	56765,96	51055,63
25V2	318248,66	249233,09	64666,77	50021,90
25V3	311678,19	218982,94	60559,62	43914,75
27V3	228336,70	248229,22	21202,41	32301,64
36V3	600763,19	656626	10779,78	18051,62

depois da impregnação, seja idêntico ou coincidente. Para isso, foram confeccionadas duas facetas que formaram um vértice de origem na amostra e, na lâmina instalada na platina do microscópio que serviu de 'porta-amostra', foram feitos dois riscos com a mesma finalidade. Feições marcantes de cada área de medida servem, também, para o posicionamento correto da amostra em qualquer época em que isso for necessário. É necessário adotar, também, um sistema de nomenclatura eficiente e prático, um sistema de códigos, composto de números e letras, que possa ser acoplado ao número da amostra e enumerar, respectivamente, face, área de medida, imagem, dados, arquivos, etc.

Tratamento e análise dos dados

Para cada imagem gerada pelo *Quantimet*, foi formado um banco de dados composto de três partes: a) Medidas relativas aos parâmetros área (μm^2), perímetro (μm), número de inclusões, anisotropia e área (%) de cada campo ou área de medida (*field, measure field, MFD*); b) Medidas relativas aos parâmetros área (μm^2), largura (*breadth, \mu\text{m}*), comprimento (*length, \mu\text{m}*), perímetro (μm) e *aspect ratio* (relação entre o comprimento e a largura) de cada inclusão (*feature, measure feature, MFT*) com área mínima de 4 *pixels*; e c) Histograma de frequência (*feature histogram, FTH*) área (μm^2) vs número de inclusões de cada área de medida.

Visando investigar o aumento ou a diminuição no tamanho da área total do conjunto de inclusões da área de medida, foi realizado um levantamento de dados de MFD (*measure field*) antes e depois da impregnação (exemplo, Tabela 3) e, um outro, utilizando o número de inclusões antes e depois da impregnação (exemplo, Tabela 4) para cada tipo de impregnação utilização de vácuo.

Amostras	Número de Inclusões		Anisotropia		Área (%)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
21F1	788	820	0,92	0,97	42,09	39,79
21F2	561	512	1,12	1,06	42,18	39,06
21F3	309	192	1,27	1,33	43,03	36,1
21F4	567	342	1,4	1,45	41,2	35,32
21F5	296	222	1,54	1,82	32,3	23,34
25V1	612	700	1,3	1,39	56,71	49,2
25V2	944	838	1,31	1,22	39,74	31,13
25V3	936	988	1,28	1,18	38,92	27,35
27V3	313	646	0,96	0,96	28,52	31
36V3	72	200	0,65	0,8	75,03	82

Tabela 4

Exemplos de dados sobre o número de inclusões antes e depois da impregnação com óleo mineral incolor sem utilização de vácuo.

Número de inclusões	MFD - <i>Measure Field</i>		MFT - <i>Measure Feature</i>	
	Antes	Depois	Antes	Depois
2F1	556	291	246	119
2F2	1057	314	394	124
2F4	463	130	214	50
6F1	234	257	41	54
12V2	258	308	89	114
14F1	130	378	82	147

As modificações nos tamanhos das áreas totais dos conjunto de inclusões das áreas de medidas e o rendimento das impregnações realizadas podem ser resumidas na Tabela 5.

Tabela 5

Exemplo de quantificação das impregnações de esmeraldas conhecidas como *oiling*.

Tamanho da área total	Óleo incolor sem vácuo	Óleo incolor com vácuo	<i>Opticon</i> incolor com vácuo	<i>Opticon</i> + corante com vácuo
Aumentou n de amostras % de amostras	16,8% 07 amostras 25 %	6,3 % 07 amostras 31,8 %	9,1 % 02 amostras 2,5 %	15,6 % 01 amostras 5,0 %
Reduziu n de amostras % de amostras	12,2 % 21 amostras 75,0 %	12,7 % 15 amostras 68,2 %	11,9 % 78 amostras 97,5 %	5,4 % 19 amostras 95,0 %



A impregnação pode proporcionar uma redução na área total das inclusões, mas aumentar o perímetro total das inclusões e o número de inclusões, e esse pode ser o exemplo em que, a impregnação foi parcial, ou seja, subdividiu ou transformou uma inclusão de área maior em duas ou mais inclusões de áreas menores. Comparando os dados obtidos por meio da interpretação de imagens geradas e processadas pelo *Quantimet Q600S* para cada tipo de impregnação, foi possível estabelecer os tipos diferentes de efeitos da impregnação (exemplos nas Tabelas 6, 7 e 8).

Tabela 6

Diagnóstico do efeito da impregnação com *Opticon* incolor utilizando vácuo sobre a área total das inclusões da área medida.

Área total das inclusões	Nº de inclusões	N de áreas de medidas (amostras)
Aumentou	reduziu	00 (00,0%)
Aumentou	aumentou	02 (03,3%)
Reduziu	reduziu	20 (32,8%)
Reduziu	aumentou	39 (63,9%)

Tabela 7

Áreas totais das inclusões (MFD) médias, antes e depois da impregnação das amostras com *Opticon* incolor e utilizando bomba de vácuo.

	78 áreas de medidas (amostras)		02 áreas de medidas (amostras)	
	Antes	Depois	Antes	Depois
Área (μm^2)	388.154,5	342.096,1	414.549,9	452.427,6
Área (%)	48,5	43,3	51,8	56,5



Tabela 8

Dados de MFT (*measure feature*) de cinco inclusões sólidas da amostra 26V4, respectivamente, antes e depois da impregnação com *opticon* mais corante e utilizando vácuo.

MFT (<i>measure feature</i>)	Área (μm^2)	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Perímetro (μm)	Aspect Ratio
Antes	13522,81	303,57	126,98	2057,54	2,39
	320720,94	1107,14	916,67	29271,87	1,21
	5613,84	142,86	65,48	539,68	2,18
	62929,30	515,87	390,87	6700,41	1,32
	9723,83	202,38	132,94	1261,91	1,52
Depois	12357,53	303,57	125,00	2069,45	2,43
	312508,84	1089,29	900,80	28724,25	1,21
	5448,49	140,87	65,48	503,97	2,15
	55012,45	498,02	373,02	6281,76	1,34
	5074,50	115,08	101,19	781,75	1,14

Também foi estudado o comportamento ou a frequência das inclusões da área de medida quanto ao tamanho das áreas, antes e depois da impregnação, conforme exemplo, na Tabela 9.

Tabela 9

Número de inclusões por faixa de tamanho das áreas de medidas (amostras) 15V3 e 5F3, respectivamente, antes e depois da impregnação com óleo incolor e utilizando vácuo.

Amostras 15V3	Número de inclusões	
Área (μm^2)	Antes	Depois
0 - 100	96	43
100 - 200	14	8
200 - 300	4	3
300 - 400	4	2
400 - 500	1	0
500 - 600	1	0
600 - 700	1	0
700 - 800	0	0
800 - 900	0	1
900 - 1000	2	0

Amostras 5F3	Número de inclusões	
Área (μm^2)	Antes	Depois
0 - 50	36	133
50 - 100	12	20
100 - 150	2	21
150 - 200	3	12
200 - 250	1	6
250 - 300	1	2
300 - 350	1	4
350 - 400	0	1
400 - 450	0	1
450 - 500	0	2

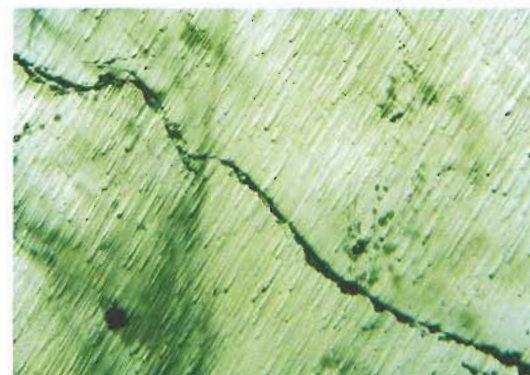
Conclusões

1. No caso das esmeraldas, as impregnações incolores podem ter quatro aplicações:

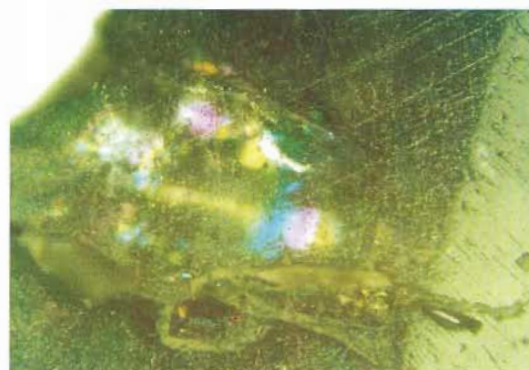
a) Diminuir ou eliminar o contraste óptico de inclusões (fraturas e cavidades) que atingem a superfície, tornando-as menos visíveis, isto é, melhorando a transparência, a aparência e a qualidade das esmeraldas (Fotos 1a e 1b). Nesse caso, o óleo, a resina ou outra substância a ser injetada nessas inclusões deve ter um índice de refração próximo ao da esmeralda.

b) Eliminar ou diminuir o efeito dos flashes coloridos provenientes do fenômeno de interferência da luz nessas inclusões (Fotos 2a e 2b) e, conseqüentemente, contribuir com uma melhoria na cor da esmeralda, uma vez que as inclusões coloridas influenciam a cor da gema.

c) Proteger a gema, quando resinas ou substâncias adesivas são utilizadas para o preenchimento de fraturas e/ou cavidades, para aumentar o grau de coesão da gema.



Fotos 1a e 1b. Áreas de medidas (amostras) 29V1 e 29V2, respectivamente, antes e depois da impregnação com *Opticon* incolor e utilizando bomba de vácuo. Nicóis cruzados.

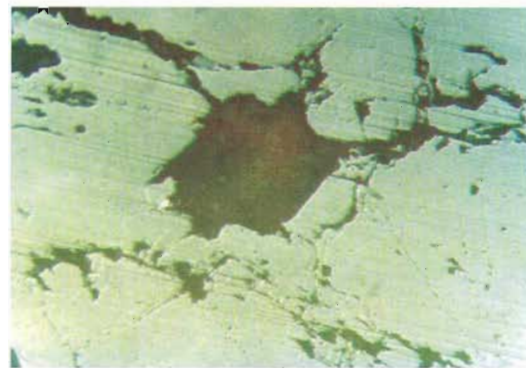


Fotos 2a e 2b. Área de medida (amostra) 16F1, respectivamente, antes e depois da impregnação com óleo mineral incolor e sem utilização de vácuo. Nicóis cruzados. (Aumento 25x).



d) Estabilizar a impregnação realizada, utilizando um agente plastificante ou endurecedor, tais como, *Opticon* e selante com *Opticon* mais endurecedor, impregnação com óleo e polimento com cera.

2. Por outro lado, resultados desfavoráveis podem ser obtidos em algumas inclusões sólidas, como por exemplo, inclusões de biotita/flogopita (Fotos 3a e 3b). Nesse caso, ao invés de eliminar ou torná-las menos evidentes, tais inclusões tornam-se ainda mais conspícuas (Tabela 10).

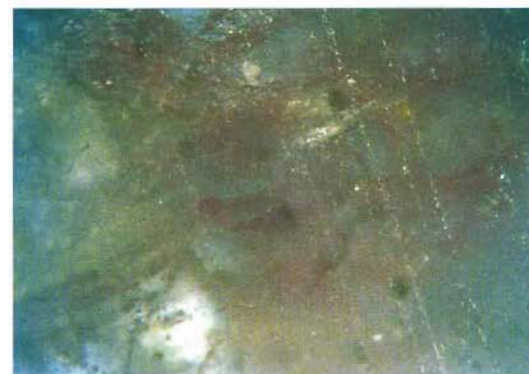
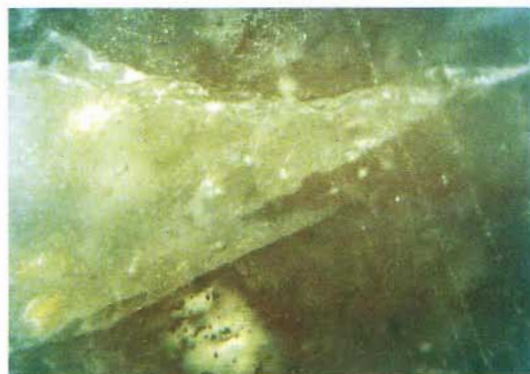


Fotos 3a e 3b. Área de medida (amostra) 1F1, respectivamente, antes e depois da impregnação com óleo mineral incolor e utilizando bomba de vácuo. Nicóis cruzados. (Aumento 25x).

Tabela 10. Dados de MFT (*measure feature*) relativos à inclusão de biotita/flogopita da área de medida 1F1, antes e depois da impregnação com óleo mineral incolor utilizando bomba de vácuo.

MFT (<i>measure feature</i>)	Área (μm^2)	Comprimento (μm)	Largura (μm)	Perímetro (μm)	<i>Aspect Ratio</i>
Antes	236.883,44	1.014,67	740,08	11.759,94	1,41
Depois	296.340,50	1.210,32	872,03	10.174,62	1,39
Variação (%)	+ 25,2	+ 16,2	+ 17,7	-13,5	-1,4

3. Um outro resultado negativo ocorre quando a eliminação de fraturas e/ou cavidades revela outras inclusões que, anteriormente, estavam encobertas pelas primeiras (Fotos 4a e 4b).



Fotos 4a e 4b. Área de medida (amostra) 10V2, respectivamente, antes e depois da impregnação com óleo mineral incolor e sem utilização de vácuo. Nicóis cruzados. (Aumento 25x).

4. Entre esmeraldas tratáveis, algumas são mais convenientemente tratadas (*enhanced*) que outras. A aceitação de preenchimento depende da limpeza das fraturas e cavidades, das dimensões das aberturas permeáveis, do índice de refração e do tipo de substância impregnante, da metodologia de impregnação, etc. Resíduos de tratamentos prévios, das etapas de lapidação ou de preparação das amostras, substâncias gordurosas ou sujeiras de um modo geral, freqüentemente, dificultam a penetração do material de preenchimento.

5. A quantificação das impregnações das amostras foi possível, principalmente, por meio dos dados quantitativos provenientes das imagens geradas, analisadas e processadas pelo *Quantimet Leica Q600S*. Com esse sistema, foi possível a obtenção de dados ou parâmetros, selecionados livremente a partir de uma lista disponível, relacionados tanto a conjuntos de inclusões ou áreas específicas de amostras quanto a cada uma das inclusões mapeadas nessas áreas.

6. O *Quantimet Leica Q600S* apresenta vantagens e limitações, isto é, necessita de determinadas condições básicas para o seu bom funcionamento a fim de fornecer dados e informações mais confiáveis. Assim sendo, mesmo que as características intrínsecas da amostra, tipo de inclusão, impregnante e impregnação sejam satisfatórias, a quantificação dos parâmetros escolhidos pode levar a conclusões errôneas, se não for realizada e interpretada corretamente.

7. Nas impregnações coloridas ou tingimentos, as substâncias utilizadas para preencher fraturas e cavidades em esmeraldas, tais como óleos, polímeros, resinas, etc. são adicionados corantes orgânicos, inorgânicos ou sintéticos, visando modificar a cor da esmeralda. Esse tipo de tratamento, que não é aceito pelo mercado, mas largamente utilizado por pessoas antiéticas (especialmente quando não divulgam o tipo de impregnante utilizado), além de modificar a transparência, altera a cor da esmeralda e, portanto, trata-se de um exemplo de falsificação de esmeralda.



Bibliografia Consultada

- CIBJO. 1995. *Confederation Internationale de la Bijouterie, Joaillerie, Orfèvrerie des diamants, perles et pierres. Boletín del Instituto Gemológico Español*, 36:57-65.
- Hänni, H.A. 1999. *Fissure-filled emeralds and their detection. Gems & Gemology*, 35 (3):93-94.
- Hänni, H.A. et al. 1997. *A Renishaw Raman Microscope in the gemmological laboratory: first experiences of application. The Journal of Gemmology*, 25(6): 394-406.
- ICA. 1997. *Gemstone Enhancement Charts. International Colored Gemstone Association*. 6p.
- Johnson, M.L. & Muhlmeister, S. 1999. *Characterization of some emerald filling substances. Gems & Gemology*, 35(3):149-151.
- Johnson, M.L.; Elen, S. & Muhlmeister, S. 1999. *On the identification of various emerald filling substances. Gems & Gemology*, 35(2):82-107.
- Kammerling, R.C. & Fryer, C.W. 1995. *Raman Spectroscopy and emerald fracture fillers. Gems & Gemology*, 31(4):266-273.
- Kammerling, R.C. et al. 1991. *Fracture filling of emeralds: opticon and traditional 'oils'. Gems & Gemology*, 27(2):70-85.
- Kiefert et al. 1999. *Identification of filler substances in emeralds by infrared and Raman spectroscopy. Journal of Gemmology*, 26(8):501-520.
- Koivula, J.I.; Kammerling, R.C.; Fritsch, E. 1992. *Kit with colored fracture filler. Gems & Gemology*, 28(3):205.
- Koivula, J.I.; Kammerling, R.C.; Fritsch, E. 1993. *Aparatus for fracture filling gems. Gems & Gemology*, 29(1):62-63.
- Koivula, J.I.; Kammerling, R.C.; Fritsch, E. 1994. *New emerald treatment / Polishing systems from Israel. Gems & Gemology*, 30(2):129-130.
- McClure, S.F. et al. 1999. *Classifying emerald clarity enhancement at the GIA Gem Trade Laboratory. Gems & Gemology*, 35(4):176-185.
- Nassau, K. 1994. *Gemstone enhancement: history, science, and state of the art*. 2a ed. 252p.
- Polli, G.O. 1999. *Tratamento de inclusões em esmeraldas da Mina da Belmont, Itabira (MG). Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado*. 245p.
- Polli, G.O.; Guerra, W.J. & Ferreira, C.M. 2000a. *Treatment of inclusions in emeralds from Belmont Mine, Itabira, Minas Gerais, Brazil. In: Geowissenschaftliches Lateinamerika-Kolloquium*, 17, 2000, Stuttgart. Profil, Universität Stuttgart, Band 18, CD, file 60.pdf, 4p.
- Polli, G.O.; Guerra, W.J. & Ferreira, C.M. 2000b. *Treatment of inclusions in emeralds from Belmont Mine, Itabira (MG). Simp. Bras. Trat. Caract. de Gemas*, 1, 2000, Ouro Preto, Anais... 8p. (No prelo)
- Ringsrud, R. 1983. *The oil treatment of emeralds in Bogotá, Colômbia. Gems & Gemology*, 19(3):149-156.
- Themelis, T. 1997a. *The Fracture Infill Apparatus (FIA). GEMLAB INC. Gemstone Enhancement, Services & Equipment. Home page: <http://www.ganoksin.com/gemlab/products>, p. 3-4.*
- Themelis, T. 1997b. *Emerald oiling (in-fill) process. The GemLab Report, October 1997 - Issue number 4. Home page: <http://www.ganoksin.com/borisat/nenam/gemlab4>. 8p.*

capítulo cinco

Berilo

Antonio Luciano Gandini
Adriana Borrelli Achtschin
Vitória Régia P. R. O. Marciano
Rosa Maria Silveira Bello
Antonio Carlos Pedrosa-Soares

I n t r o d u ç ã o

A palavra berilo origina-se do latim, beryllus, em alusão a sua cor verde-clara mais freqüente. O berilo mais abundante é aquele utilizado como minério do metal berílio, denominado escória pelos garimpeiros. Quando se emprega simplesmente a palavra berilo, não há conotação gemológica.

Esse mineral possui diversas variedades utilizadas como gema em função de sua cor, tais como: esmeralda verde-grama, água-marinha azul ou esverdeada., goshenita incolor ou branca., heliodoro amarelo-dourado, amarelo-esverdeado ou amarelo-acastanhado, morganita cor-de-rosa a salmão e bixbita vermelho-groselha ou vermelho-salmão. A esmeralda é a variedade de maior importância econômica. Por isso, será abordada em um capítulo especial neste volume, focalizando a sua prospecção.

O berilo já era utilizado como gema pelos egípcios e outros povos da Antigüidade. A Babilônia é mencionada como o mercado mais antigo de gemas, onde, há 4000 anos a.C., a esmeralda já era comercializada. Acreditava-se que o berilo tinha o poder de curar lepra e doenças do fígado, proteger o amor conjugal, agir contra envenenamento, além de possuir dons proféticos, servindo também para descobrir ladrões. Na Bíblia, já era citado, desde Moisés, como uma das doze pedras colocadas na vestimenta do Sumo Sacerdote. Os marinheiros têm a água-marinha como um talismã. As primeiras informações mineralógicas foram apresentadas por Rorné de Lisle em 1772 e, posteriormente, por Haüy em 1801.

Os principais países produtores de berilo no mundo são: Brasil, Colômbia, Rússia, EUA, Egito, Namíbia, Zâmbia, Zimbabwe, África do Sul, Tanzânia, Madagascar, Nigéria, Moçambique, Paquistão, Afeganistão, Índia, Áustria, Austrália, Noruega, Sri Lanka, Canadá, México e Itália.

A existência de grandes jazidas de gemas coradas fez com que a Província Pegmatítica Oriental do Brasil, neste livro denominada por Província Gemológica Oriental do Brasil, se tornasse um dos locais mais importantes do País e do mundo, tanto do ponto de vista econômico quanto científico em relação a gemas. Os depósitos estão localizados, principalmente, na região Nordeste de Minas Gerais, nos vales dos rios Doce e Jequitinhonha, prolongando-se pelo Sul da Bahia e Oeste do Espírito Santo. Entre as principais gemas oriundas dessa região, destacam-se água-marinha, considerada a 'gema brasileira', crisoberilo, kunzita e hiddenita, turmalinas, granadas, entre outras, sendo alguns considerados como os melhores do mundo. Além desses mais importantes, os pegmatitos dessa Província produzem uma série de minerais industriais e de gemas menos comuns, sem similares em nenhum outro local, podendo ser mencionados o euclásio, a fenaquita, a titanita, a escapolita, a brasilianita, a petalita, a ambligonita, a herderita, e outros menos conhecidos.

O Brasil possui as maiores reservas mundiais de berilo, tanto industrial quanto gemológico Crowson (1994) e Moura (1981), salientam que as primeiras descobertas de berilo couberam à expedição de Fernandes Tourinho, em 1571, às margens do rio Itamarandiba, entre as cidades de Capelinha e Turmalina. Posteriormente, são mencionadas descobertas de águas-marinhas e turmalinas na serra divisora das bacias dos rios Mucuri, Jequitinhonha e Doce. Com o advento da chegada dos primeiros imigrantes alemães, a partir de 1850, na região de Teófilo Otoni, a mineração de minerais-gemas teve um grande impulso. Em 1910, a descoberta da água-marinha Papamel, que pesava 110,5kg e com 48,5cm de comprimento, no vale do rio Marambaia, trouxe destaque para essa espécie gemológica no Brasil (Proctor 1984). Durante a década de 70 do século XX, foram retirados da Mina Papamel milhares de quilos de águas-marinhas.

Durante a Segunda Guerra Mundial, a Província Gemológica Oriental Brasileira foi intensamente trabalhada, chegando a suprir cerca de 75% das necessidades de berilo industrial dos países aliados. O berilo era considerado um dos minerais estratégicos, juntamente com as micas, feldspatos, quartzo e minerais de lítio. Os pegmatitos portadores de mineralizações de berilo, além de terem grande importância econômica, a partir dos anos 50 do século XX, destacam-se como produtores de gemas ou peças de coleção, colocando Minas Gerais e o Brasil no cenário internacional. A água-marinha Marta Rocha, pesando por volta de 34kg, com mais de 60% de limpidez, também encontrada no vale do rio Marambaia, é a mais famosa.

O tamanho dos cristais de berilo é muito variável, de milimétricos a gigantescos, com hábito prismático. Em pegmatitos, são freqüentes cristais com 1m de comprimento. Cristais muito grandes, comuns em pegmatitos, normalmente são de qualidade industrial. A literatura registra alguns exemplos dessas raridades: Roberts *et al.* (1974) citam um berilo de 5,49m de comprimento por 1,83m de largura; Dana & Hurlbut Jr. (1976) fazem referência a um com 25t e 9m de comprimento; Gaines *et al.* (1997) citam um cristal de pegmatito com 18m de comprimento por 3,5m de largura.

No Pegmatito do Ferreirinha I, Governador Valadares, foram observados vários prismas de mais de 2m de comprimento: um deles alcançava 1m de diâmetro. Nessa mesma região, em 1942, foi encontrada uma água-marinha com 108kg no rio do Bugre. Delaney (1996) cita a ocorrência de um cristal com 105t, em 1950, próximo a Galiléia.

Talvez um dos maiores cristais lapidados de água-marinha brasileira esteja no Museu Roosevelt, em New York, pesando 1285ct, proveniente da região de Pedra Azul. No Instituto Smithsonian, em Washington, encontra-se outro exemplar de água-marinha com 911ct, da região de Teófilo Otoni - Marambaia (Proctor 1984).

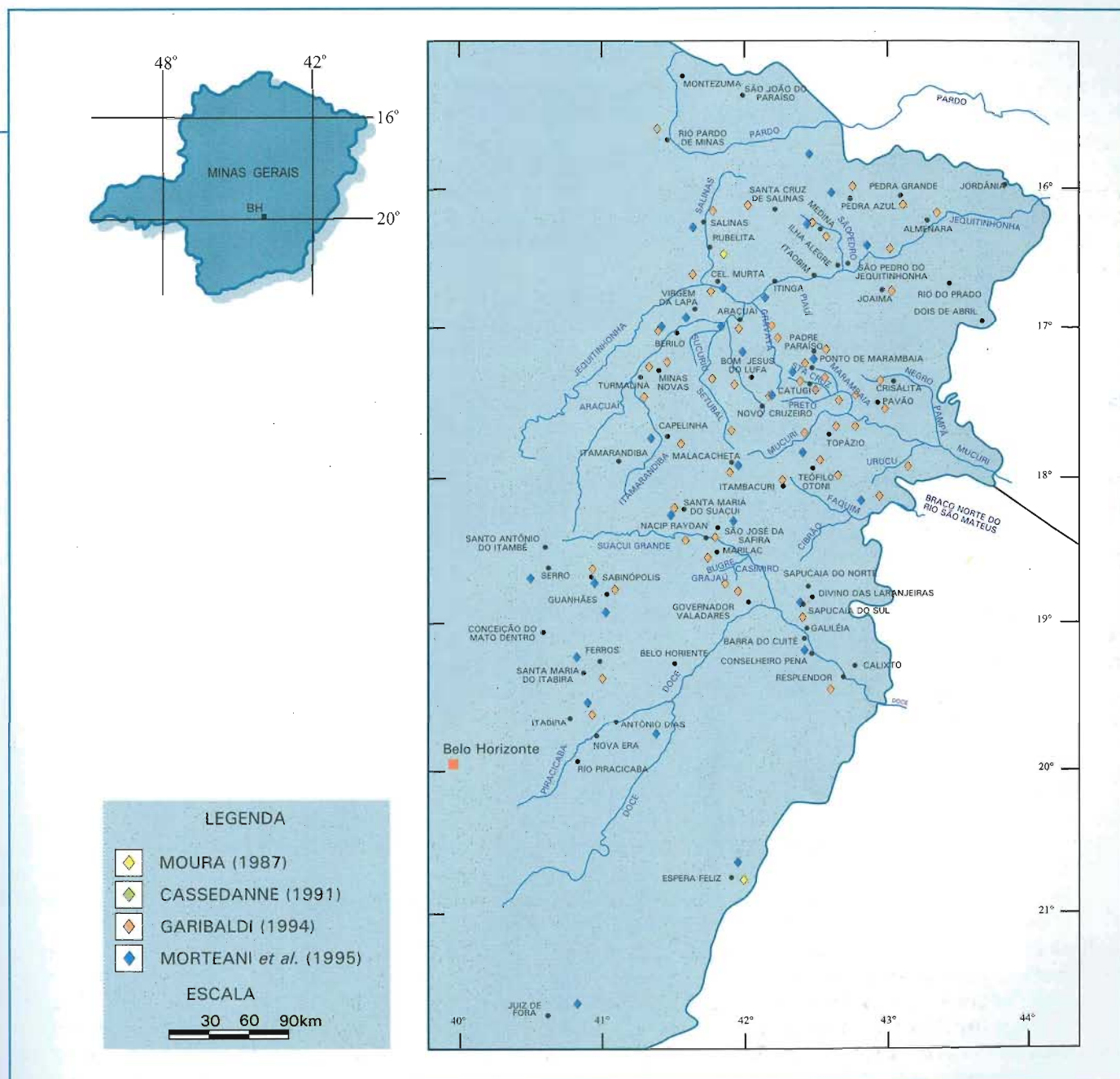
No Brasil, além da Província Gemológica Oriental, ocorre também na Província Nordeste, que abrange os estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, ainda com ocorrências em Goiás e Tocantins. No Estado de Minas Gerais (Figura 1) (Alecim 1982, Proctor 1984, Garibaldi 1994, Cassedanne 1991, Morteani *et al.* 1995, Moura 1987), destacam-se as seguintes variedades:

Água-marinha: Araçuaí (lavra do Maxixe); Ataléia (córrego São Fidelis); Belo Oriente; Berilo; Capelinha; Carai; Carangola; Catugi (também conhecida como Três Barras vale dos rios Negro, Preto, Mucuri e Pampã); Conceição do Mato Dentro; Conselheiro Pena; Coronel Murta; Crisólita; Divino das Laranjeiras; Espera Feliz; Galiléia; Governador Valadares (Ipê, Ferreirinha, Golconda, Escondido); Itambacuri; Itinga; Malacacheta; Medina; Minas Novas; Nacip Raydan; Novo Cruzeiro (distrito de Bom Jesus do Lufa, na Serra do Urubu de onde já foi retiradas mais de 2t de águas-marinhas); Pavão (córrego Taquaras); Pedra Azul; Pedra Grande; Resplendor; Sabinópolis (lavra da Generosa); Salinas; Santa Maria de Itabira (lavra do Tatu); Santa Maria do Suaçuí; Ferros; Santo Antônio do Itambé; Brejaúba; Topázio; Turmalina; Virgem da Lapa; vales dos rios Jequitinhonha (Ilha Alegre, cristais com mais de 9kg de excelente qualidade gemológicas), Marambaia (Ponto do Marambaia, Santa Cruz Três Barras - já produziu mais de 1t de águas-marinhas com qualidade gemológica), Itamarandiba, Setúbal, Gravatá, Sucuruí, Araçuaí, Mucuri, Urucum, São Mateus e Garajau;

goshenita: Araçuaí Minas Nova; Governador Valadares (lavra das Criminosas e do Escondido); Marilac lavra do Veadinho; Resplendor;

heliodoro: Araçuaí; Novo Cruzeiro (Bom Jesus do Lufa); Galiléia Sapucaia do Norte; Guanhães; Joáima; Medina; Minas Novas; Novo Cruzeiro; Rio do Prado (distrito de Dois de Abril); Sabinópolis (lavra da Generosa); Santa Maria de Itabira lavra da Ponte da Raiz; Santa Maria do Suaçuí; Serro; vale do rio Jequitinhonha Ilha Alegre; Marambaia Ponto do Marambaia; Virgem da Lapa;

morganita: Araçuaí; Coronel Murta Barra de Salinas; Galiléia (lavra do Tim, onde, em 1973, foram achados 300 cristais desta variedade e no distrito de Sapucaia); Maxixe (vale do rio Jequitinhonha); Minas Novas; Governador Valadares (lavra do Escondido e da Golconda); Conselheiro Pena (lavra da Morganita); Catugi; Resplendor, (Calixto); Teófilo Otoni.



Mineralogia

Os berilos pertencem a um grupo de minerais denominado Grupo do Berilo, que engloba aluminossilicatos de Be, Mg e Fe. Segundo Gaines *et al.* (1997), a fórmula geral do grupo é expressa da seguinte maneira: $A_{2-3}B_2[Si_5Si, Al]O_{18}$, onde A = Be, Mg, Fe e B = Al, Sc, Fe.

Embora sejam representados pela fórmula geral $Be_3Al_2Si_6O_{18}$, com valores aproximados de $BeO = 14,0\%$, $Al_2O_3 = 19,0\%$ e $SiO_2 = 67,0\%$, análises químicas detalhadas mostram que é comum a presença de H_2O e álcalis Li^+ , Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , que, em certas variedades, podem atingir até 11% em peso. Além desses componentes, o berilo contém normalmente impurezas de Fe, Mg, Mn, Ti, Cr, V, Ca, P, Ba, Zr, Sr, Sc, Zn, entre outras.

A característica principal do berilo consiste na presença dos anéis hexagonais compostos por seis tetraedros de Si-O, formando um aspecto de favo com canaliculos contínuos e ocas paralelos ao eixo cristalográfico c do cristal, que podem ser ocupados por íons maiores (Figura 2). No interior dos anéis de cada grupo SiO_4 , dois dos átomos de oxigênio são compartilhados por dois outros grupos de SiO_4 adjacentes, de modo que o radical dos anéis seja representado por $[Si_6O_{18}]^{12-}$, com uma relação Si:O igual a 1:3. Os átomos de Al^{3+} e Be^{2+} posicionam-se, alternadamente, entre os anéis, sendo cada Al^{3+} coordenado por um grupo octaédrico de seis átomos de oxigênio $[AlO_6]^{9-}$ e cada Be^{2+} rodeado por quatro átomos de oxigênio $[BeO_4]^{6-}$, com a forma de um tetraedro distorcido. Os oxigênios dos anéis $[Si_6O_{18}]$ vizinhos se unem tanto lateral como verticalmente pelo Al^{3+} e Be^{2+} .

Tendo como base estudos das várias substituições isomórficas na estrutura do berilo, normalmente ligadas aos elementos alcalinos, pode-se propor uma fórmula mais geral com íons mono e bivalentes, importantes para o estudo das causas de cor, determinantes das suas diversas variedades, isto é: $[A]X_3Y_2T_6O_{18}$ Gaines *et al.* 1997, onde:

A = H_2O , OH, Na, Ca, Fe^{2+} , K, Cs, Rb, $\rightarrow$	- vacância canais.
X = Be, Al, Li, Si^{4+}	sítio tetraédrico.
Y = Al, Fe^{2+} , Mg, Fe^{3+} , Ca, Mn^{2+} , Cr^{3+} , V^{5+} , Te^{4+} , Sc	sítio octaédrico.
T = Si^{4+}	sítio tetraédrico.

Sítio tetraédrico:

Si^{4+} em tetraedros $[SiO_4]^{4-}$. Se estiver em excesso, pode também substituir o Be no tetraedro $[BeO_4]^{6-}$;

Sítio octaédrico:

Al^{3+} em octaedros $[AlO_6]^{9-}$. No caso de excesso, pelo seu caráter anfótero, entra nos tetraedros, substituindo Si e Be;

$Fe^{2+/3+}$, Mg^{2+} , Mn^{2+} , Cr^{3+} , Sc^{3+} substituindo o Al nos octaedros $[AlO_6]^{9-}$;

Li^+ nas posições do Al, não substitui, mas ocupa vacâncias quando existir uma deficiência;

Sítio tetraédrico:

Be^{2+} em tetraedros $[BeO_4]^{6-}$ ou junto com o Si nos tetraedros $[SiO_4]^{4-}$. Caso haja falta de Si e Al, acontece, preferencialmente, uma substituição do Al;

Li^+ nas posições do Be;

Canal:

Na^+ , Ca^{2+} nos canais entre dois grupos HOH e, raramente, nos espaços entre os anéis;

K^+ em posições semelhantes ao grupo HOH dentro dos canais. Às vezes, nas posições ocupadas pelo Rb^+ ;

Rb^+ nos canais entre HOH e três oxigênios de um anel ditrigonal, fortemente deformado;

Cs^+ nos canais, análogo ao Rb^+ , mas apresentando apenas uma leve distorção dos anéis;

Fe^{2+} pode também estar presente nos canais ou ocupar vacâncias, quando existir uma deficiência em Al.



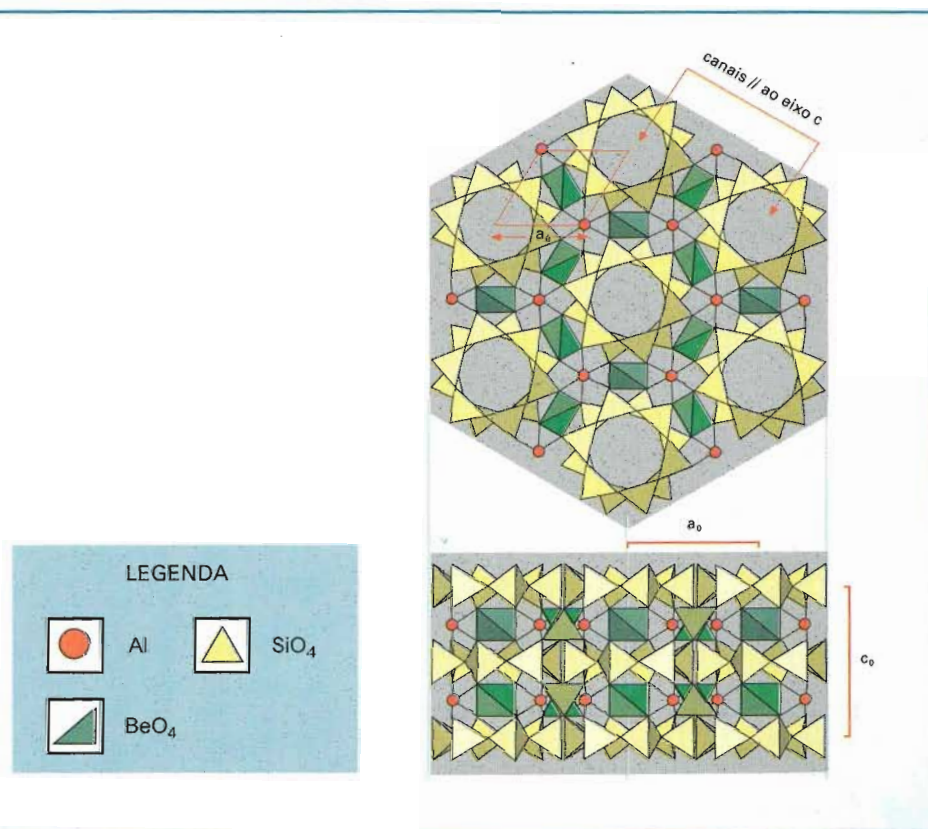
O estudo das inclusões, cristalinas e fluidas, em berilo, é muito significativo para a caracterização de diferentes ocorrências geológicas, pois elas representam uma característica assinatura da gema.

A água está presente no berilo em teores de até 4% $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, onde n varia de 0 a 1, apesar de não fazer parte da fórmula química do mineral. Essa porcentagem é função da natureza e da quantidade de outras 'impurezas' presentes.

Segundo Wood & Nassau (1968), existem dois modos das moléculas de água se posicionarem nos canais da estrutura do berilo. As moléculas cujo eixo H-H ficam paralelas ao eixo c do berilo são do tipo I; quando esse eixo for perpendicular ao eixo c , são do tipo II. Esse fato implica na presença de álcalis como impureza nos canais, promovendo atração eletrostática que provoca a rotação da molécula de água, de forma que o íon O^{2-} fica ao lado do álcali.

A separação desses dois tipos de moléculas de água é realizada por meio de análises de espectroscopia de absorção no infravermelho, na qual os picos de absorção apresentam valores distintos. Esse método também é empregado na separação de esmeraldas naturais de sintéticas. Estudos sobre esse método em moléculas de H_2O e CO_2 presas na estrutura de berilo, realizados por Flanigen *et al.* (1967) e Wood & Nassau (1968), indicaram as condições de formação desse mineral.

Figura 2. Estrutura do berilo: a. projeção da face basal 0001; b. projeção correspondente à face do prisma de 1ª ordem $\{100\}$, com o eixo c vertical.



O berilo pertence ao sistema hexagonal, com mais alto grau de simetria bipiramidal-dihexagonal, na classe 6mm e ao grupo espacial P6/mcc. O seu hábito pode ser prismático longo ou curto tabular. É comum apresentar-se em cristais individuais, euédricos perfeitos e, raramente, em agregados. Em geral, predominam as faces do prisma $10\bar{1}0$ e do pinacóide 0001. Menos comuns são as faces das bipirâmides $12\bar{1}1$ e $10\bar{1}1$ e do prisma dihexagonal $11\bar{2}0$. As faces dos prismas, normalmente, são estriadas verticalmente. Às vezes,

Tabela 1 Propriedades físicas e dados geológicos do berilo.

Cristalográficas	
Simetria	Hexagonal, classe 6mm, grupo espacial P6/mcc
Cela unitária	$a_0 = 9,200 - 9,230\text{\AA}$; $c_0 = 9,187 - 9,249\text{\AA}$; relação axial $a:c = 1:0,996$; $Z = 2$
Hábito	Prismático com terminações multifacetadas, algumas vezes exibindo 12 lados em seção transversal, com estriações ao longo do eixo c. Também com hábito tabular
Geminação ou macla	São raras
Principais reflexões RX	$2,867\text{\AA}$ 100; $3,254\text{\AA}$ 95; $7,98\text{\AA}$ 90
Mineralógicas	
Químicas	
Fórmula	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot x\text{H}_2\text{O}$
Álcalis presentes	Li, Na, K, Rb, Cs; > álcalis implica em > I.R., > d, > a_0 > outros elementos, o c permanece constante
Moléculas nos canais	H_2O , CO_2 , He, Ar, F
Fusibilidade	5 - 5 $\frac{1}{2}$; funde-se formando um esmalte
Calcinação	Calcinado intensamente produz um pouco de água
Solubilidade	Insolúvel na maioria dos ácidos, atacado por ácido fluorídrico
Mecânicas	
Tenacidade	Quebradiço, sensível à pressão - cuidado na cravação
Fratura	Irregular a conchoidal assimétrica
Clivagem	Pinacoidal basal imperfeita {0001}
Traço	Branco
Dureza relativa	$7 \pm 0,8$ Mohs
Densidade relativa	2,62 a 2,66 quando puro, até 2,91 para álcali-berilo

cristais gemológicos oriundos de corpos de substituição em pegmatitos exibem prismas dihexagonais e terminação complexa com várias faces de pirâmide. As geminações ou maclas no berilo ocorrem raramente e se dão segundo os planos $31\bar{4}1$, $11\bar{2}0$.

As propriedades físicas características do berilo, bem como os dados sobre a sua ocorrência e associação paragênese, encontram-se na Tabela 1, aliadas a dados cristalográficos.

Ópticas		
Brilho	Vitreo	
Diafaneidade	Transparente a translúcido	
Cores/Nuances	Incolor, azul claro a forte; azul esverdeada, verde pálida a forte, amarelo claro a escuro, rosa, vermelho e leitosa	
Dados ópticos	$n_{\omega} = 1,557 - 1,599$; $n_z = 1,560 - 1,602$; $B = 0,004$ a $0,009$; dispersão = $0,014$ uniaxial negativo; $2V = 0$ a 17°	
Pleocrismo	Esmeralda distinto - natural - sintética	Verde, verde azulado e verde amarelo Verde-amarelo, verde azulado
	Água-marinha; azul distinto	Quase incolor a azul claro, azul a azul celeste
	Hellodoro fraco	Amarelo-dourado, amarelo-limão
	Morganita distinto	Rosa pálido e rosa azulado
	Azul/verde distinto	Verde-amarelo a incolor, verde azulado
	Bixbita distinto	Púrpura, incolor
Espectro de absorção	Não há um definido ; os espectros são diferentes para cada variedade	
Fluorescência	Morganita: fraca - violeta	
Geológicos		
Ocorrência	- Jazidas primárias: em drusas nos granitos e pegmatitos graníticos, sienitos nefelínicos, mica xistos, mármore, greisen, veios hidrotermais e pneumatolíticos ou como acessório em rochas ígneas ácidas - Jazidas secundárias: aluviões e colúvios	
Paragênese	Quartzo, cassiterita, turmalina, feldspato, micas, topázio, crisoberilo, fenaquita, fluorita, espodumênio, ferrocumbita, tantalita, etc.	



Foto 5. Água-marinha de cor azul intenso e lapidada na forma oval. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

Dentre as propriedades físicas, a cor, é uma das mais importantes devido ao emprego gemológico do berilo. As cores mais freqüentes são branca, verde-pálida ou verde-amarelada e, geralmente, apresentam uma diáfaneidade translúcida. O berilo transparente e colorido, também chamado berilo nobre Schumann (1992), em função de sua cor, pode ser classificado em diversas variedades empregadas como gema, entre as quais se destacam a esmeralda e a água-marinha.

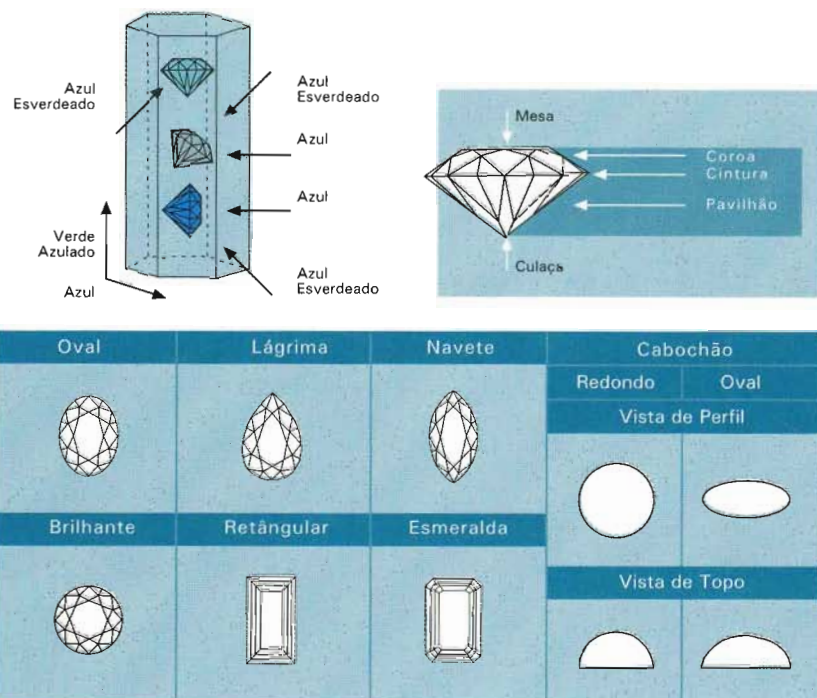
De maneira simplificada, podemos dizer que a cor pode ser causada por absorção seletiva da energia luminosa. A presença de íons de metais de transição, tais como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{2+} , V^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , entre outros, na forma de impurezas intersticiais e substitucionais na estrutura do mineral, é responsável pela gama de cores que o berilo apresenta, em função do conteúdo, posição no retículo cristalino e estado de oxidação.

Esmeralda: no grego, *smaragdus*, de cor verde intensa, verde-grama, devido à presença do cromo e/ou vanádio. A substituição do Al por Cr enfraquece a estrutura, implicando no aparecimento de inúmeras fraturas. Branco (1984) cita o Fe nas esmeraldas brasileiras e o Cu nas colombianas. Schwarz (1987), além do Cr e do Fe, inclui também o V nas esmeraldas do Brasil. Essa variedade não ocorre nos pegmatitos graníticos. Por ser sensível a pancadas, a melhor forma de lapidação é em degraus esmeralda, na qual os quatro ângulos agudos são cortados e facetados. Também pode-se usar a forma brilhante para as transparentes e de cor clara: para as translúcidas, são utilizadas as formas de cabochão ou esferas para colares. *Doublets* e *triplets* são comuns. As esmeraldas podem ser produzidas sinteticamente por vários métodos e são comercializadas indiscriminadamente. A cor da esmeralda é muito resistente à luz e ao calor, não se alterando até temperaturas de 700 ou 800°C.

A palavra água-marinha deriva do latim *agua marinus* = água do mar, explicada pela sua cor esverdeada, não utilizável como gema. Entretanto, ela pode ser azul, azul-esverdeada, verde-amarelada ou verde-azulada. Essas cores estão ligadas à presença do Fe^{2+} . A água-marinha Maxixe, de cor azul-escuro e rica em bário, perde a sua cor quando exposta à luz por muito tempo. Essa variedade ocorre na lavra Maxixe em Araçuaí. O berilo Maxixe apresenta NO_3 no canal, enquanto o tipo Maxixe contém CO_3 (Andersson 1979 e Brown 1993. refere-se ao tipo Maxixe como uma goshenita).

A melhor posição para se lapidar uma água-marinha é colocar a mesa da pedra perpendicular ao eixo n, que coincide com o c cristalográfico, ou paralela a esse eixo. Essa escolha decorre do mercado ou do próprio gosto do comprador, que prefere ora uma gema azul, ora uma com tom esverdeado. A água-marinha pode ser lapidada em diversos tipos, destacando-se a forma em degraus esmeralda. ou em tesoura, com formas retangulares, ovais, navete e gota (Figura 3). Também pode ser produzida sinteticamente, num processo antieconômico.

Figura 3. Pleocroísmo na água-marinha (Gonsalves 1949) e os diversos tipos de lapidações utilizadas nesta gema.



A água-marinha é a gema mais característica do Brasil, uma vez que foram encontradas, em Minas Gerais, as amostras mais valiosas do mundo. A região entre Teófilo Otoni e Marambaia é uma das mais importantes pela sua ocorrência. Algumas peças lapidadas mais famosas brasileiras são: a Marta Rocha, descoberta em 1954 (Mina Mucuri); IV Centenário, encontrada em 1964, com 7kg dando 15000ct de pedras lapidadas (Mina Pedroso), tal gema fazia parte de um conjunto de 4 pedaços que foram vendidos por US\$45.000; Estrela D'Alva, encontrada em 1967, com 1m por 18cm de diâmetro e com 19kg, vendida por US\$30.000.00 Mina Pioneira no vale de Três Barras. Na região de Medina, Cachacinha, vendida por US\$90.000.00 e Lúcia, descoberta em 1955, com 61kg no rio Garajau, região de Governador Valadares (Proctor 1984, Garibaldi 1994).

De um modo geral, as águas-marinhas vendidas no comércio são tratadas termicamente para melhorar a cor. Muitas vezes, esse tipo de tratamento é realizado no próprio garimpo. As águas-marinhas esverdeadas são aquecidas entre 400 e 500°C para adquirirem a cor azul. Outras variações de tonalidades podem ser tratadas entre 250 e 720°C.

Goshenita: o nome provém da jazida em Goshen, Massachussets EUA. Raramente é usada como gema, podendo ser incolor, branca, amarelada ou azulada. Para essa variedade e as relacionadas a seguir, é utilizada uma muito grande de formas de lapidação. Quando submetida aos raios Gama, pode se tornar amarelo-alaranjada ou azul, também denominada diamante Reno.

Heliodoro: do grego *hélíos* sol. + *doros* dádiva. Apresenta-se nas cores amarelo-dourada, amarelo-esverdeada, amarelo-acastanhada ou âmbar. O heliodoro sofre descoloração a 250°C. Quando tratado entre 280 e 600°C, num intervalo de 1 a 12 horas, dependendo do local onde foi coletado, pode adquirir uma cor azul.



Foto 2. Morganita, com lapidação quadrada. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

Morganita: o termo homenageia J. P. Morgan. Pode variar de cor-de-rosa a salmão, devido à presença de Mn ou Cs. Um sinônimo quase que desconhecido para essa variedade é vorobyevita em homenagem ao mineralogista russo V. I. Vorobyev. A morganita de cor clara pode ser melhorada com um aquecimento entre 200 e 400°C por alguns minutos. As de Barra de Salinas, quando 'tratadas' adquirem uma cor azul-cobalto halbanita - termo comercial, em homenagem ao proprietário da jazida, Hallev Baptiste, que parece com a safira ou tanzanita; entretanto essa cor não é permanente, podendo desaparecer quando exposta ao sol. No Instituto Smithsonian, em Washington, há duas gemas brasileiras, uma com 236ct e outra com 250ct.

Bixbita: variedade extremamente rara, que ocorre a Sudoeste de Simpson Sping, em Utah, EUA. Sua cor é bem característica, variando do vermelho-groselha ao vermelho-salmão. Na região de Ferros, ocorre, não sendo, porém, gemológica, devido à falta de limpidez. Deve-se tomar cuidado para não confundi-la com a bixbyíta.

No mundo das gemas existem muitas confusões devido aos vários tipos de designações mineralógicas, gemológicas e comerciais. Apresenta-se, a seguir, a Tabela 2, com nomes das espécies, seus substitutos amostras naturais e imitação amostras, das variedades esmeralda e água-marinha (Anderson 1980, Schumann 1992, Günther 1988).

Uma característica interessante reside na relação cor e composição química, em que pode apresentar distribuição homogênea da cor ou zonamentos, que indicam mudanças da composição durante o crescimento do cristal.

Dentre as várias propriedades físicas, as ópticas também variam em função do quimismo do berilo. Um acréscimo no teor de álcalis é seguido de um aumento no valor dos índices de refração e da densidade. A Figura 4 ilustra a variação do índice de refração com o teor de álcalis.

O brilho do berilo é vítreo e sua diafaneidade, isto é, a capacidade de transmissão da luz, varia de transparente a translúcida em amostras de mão. Dependendo das orientações das inclusões aciculares no interior dos cristais, podem exibir os fenômenos de *chatoyance* (olho-de-gato) ou de asterismo, com seis pontas, observados em peças lapidadas na forma de cabochão. Esses fenômenos têm ocorrência rara no berilo, devido à grande quantidade de outras inclusões encontradas nesse mineral.

O berilo é uniaxial negativo, apesar de desenvolver cristais biaxiais ortorrômbicos, com $2V_z$ de até 17°. Essa biaxialidade é anômala, sendo, provavelmente, resultante de tensões internas, causadas por substituições químicas e/ou defeitos surgidos durante o crescimento do cristal, por abaixamento rápido da temperatura ou da pressão, ou ainda por deformação mecânica (Foord & Mills 1978).

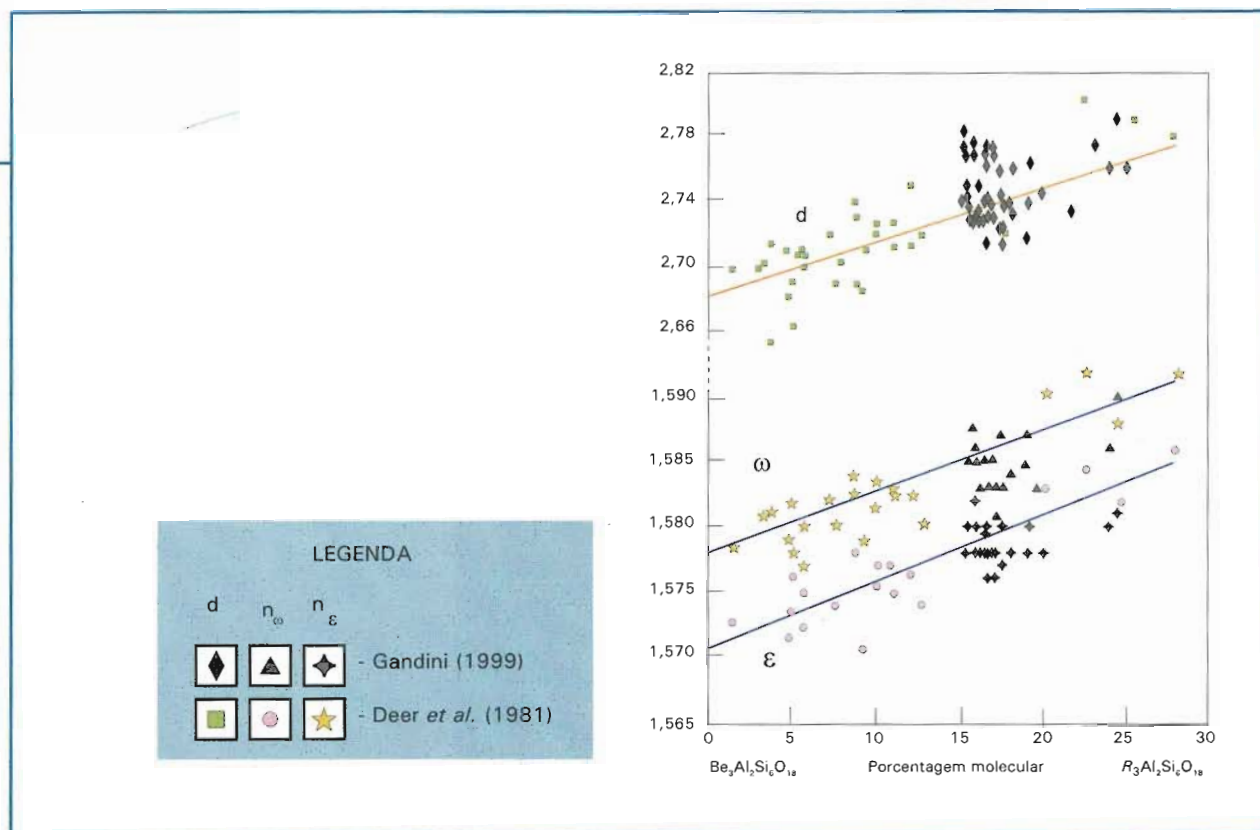
A densidade aumenta com o acréscimo de álcalis. A partir do diagrama da Figura 4, pode-se observar nitidamente um aumento na variação da densidade acompanhado de um acréscimo no teor de álcalis.

Tabela 2

Alguns substitutos e imitações da esmeralda e da água-marinha.

Espécie	Sinônimo	Densidade	Índice de refração	Birrefringência
Esmeralda		2,67 - 2,78	1,576/1,593 - 1,569/1,586	0,005 - 0,007
Demantóide		3,86	~ 1,89	nula
Uvarovita		3,90	1,87	nula
Grossulária		3,60 - 3,68	1,738 - 1,745	nula
Diopsídio		3,27 - 3,31	1,671 - 1,726	0,045
Dioptásio		3,28 - 3,35	1,644 - 1,709	0,053
Hiddenita		3,16 - 3,20	1,656 - 1,680	0,015
Peridoto	Forsterita - olivina	3,27 - 3,37	1,654 - 1,690	0,036
Turmalina verde		3,02 - 3,26	1,616 - 1,652	0,014 - 0,044
Zircão verde		3,90 - 4,71	1,777 - 1,987	0,039
Fluorita		3,18	1,43	nula
Jadeíta		3,30 - 3,36	1,654 - 1,667	0,013
Vidro de berilo		2,44 - 2,49	1,52	nula
Água-marinha		2,67 - 2,71	1,575/1,585 - 1,570/1,580	0,006
Água-marinha do Sião	Zircão	4,69	1,926 - 1,985	0,059
Água-marinha sintética	Safira sintética	3,99 - 4,00	1,766 - 1,774	0,008
Água-marinha do Brasil	Topázio	3,56	1,610 - 1,620	0,010
Água-marinha oriental	Safira ou topázio			
Euclásio		3,10	1,652 - 1,672	0,020
Cianita		3,55 - 3,66	1,712 - 1,728	0,016
Turmalina		3,02 - 3,26	1,616 - 1,652	0,014 - 0,044
Espilélio sintético		3,63	1,727	nula
Vidro duro		2,37	1,50	nula
Vidro de berilo		2,44 - 2,49	1,52	nula
Vidro de chumbo		2,63 - 3,85	1,57 - 1,64 ou +	nula

Figura 4. Diagrama com a variação dos índices de refração e também da densidade relativa em função da concentração de álcalis (Gandini 1999).



Quanto a sua dureza, há uma anisotropia acentuada em suas faces, ou seja, as faces dos prismas apresentam dureza mais elevada do que as faces basais. Para berilo alcalino, essa propriedade varia inversamente com a proporção de álcalis contidos. O traço desse mineral é branco.

Geologia

De acordo com Beus (1966), o berilo pode ser encontrado em diferentes ambientes geológicos. Os de qualidade gemológica estão associados, principalmente, a pegmatitos graníticos, rochas que possuem mineralogia essencial semelhante à do granito, constituída por feldspatos, quartzo e micas, com dimensões variando de alguns centímetros a metros. A estrutura dessas rochas pode ser não-zonada, homogênea e heterogênea. Os corpos pegmatíticos exibem dimensões as mais variadas. Os pequenos alcançam até 5m de espessura, os médios variam de 5 a 15m, os grandes, de 15 a 50m, sendo os maiores de 50m classificados como muito grandes. Descrições detalhadas de pegmatitos encontram-se no Capítulo 01 deste livro.



O berilo industrial é encontrado na zona gráfica ou mural, com hábito prismático. O da zona intermediária é, geralmente, mais desenvolvido do que o anterior e, às vezes, permite aproveitamento gemológico. As gemas são encontrados nos corpos de substituição. De um modo geral, nem todos os pegmatitos possuem grandes reservas de minerais economicamente importantes. Os que se destacam são os zonados complexos e ricos em elementos raros.

A presença de berilo em pegmatitos está relacionada ao tamanho do íon Be, ou seja, sendo muito pequeno, dificilmente substitui outro íon, ficando concentrado nos fluidos magmáticos residuais. Outros tipos de rochas onde é encontrado o berilo, são os sienitos nefelínicos, micaxistos e mármore. No caso das esmeraldas, elas estão quase sempre relacionadas a biotita-flogopita-xisto, embora as da Colômbia estejam situadas em filões de calcita que cortam calcário betuminoso. Esse mineral também pode ocorrer em aluvião, em greisens, veios hidrotermais pneumatolíticos ou como acessório em rochas ígneas ácidas.

Quanto aos cristais de berilo, podemos dizer que os azulados são os que primeiros se cristalizam, sendo, contudo, pobres em álcalis e com teores relativamente altos em ferro. Normalmente estão associados a pegmatitos não-zonados, mas podem ocorrer também nas zonas mais externas dos pegmatitos zonados, tanto os simples quanto os complexos. Numa seqüência progressiva, com o enriquecimento do pegmatito em elementos raros, o berilo adquire uma cor rosada, possuindo baixo teor em ferro, alto teor em álcalis e impurezas de Mn, associado a lepidolita e a níveis predominantemente albiticos. Nesse último caso, ele ocorre sempre nas zonas mais internas dos pegmatitos zonados complexos. Portanto, é um dos minerais que permite a caracterização geoquímica dos pegmatitos.

O primeiro trabalho sobre cristais de berilo brasileiros com abordagem geoquímica deve-se a Correia Neves *et al.* (1984).

O berilo encontrado nos pegmatitos pode apresentar alterações que o transformam, parcial ou totalmente, em outros minerais como caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], muscovita [$\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$], bavenita [$\text{Ca}_4\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{26}(\text{OH})_2$], epididimita [$\text{NaBeSi}_3\text{O}_7(\text{OH})$], bertrandita [$\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$] e em milarita [$\text{K}_2\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Be}_4\text{Si}_{24}\text{O}_{80} \cdot \text{H}_2\text{O}$], perdendo assim sua transparência e brilho, comprometendo o uso gemológico da amostra.

Berilo dos Pegmatitos Mineiros

Muitos são os trabalhos publicados sobre o berilo de procedência do Estado de Minas Gerais (Issa Filho *et al.* 1980, Moura 1981, Sauer 1982, Correia Neves *et al.* 1984, Proctor 1984, Marciano 1985, Santos 1985, Cassedanne 1991, Marciano *et al.* 1992, Marciano *et al.* 1993, Garibaldi 1994, Marciano *et al.* 1994, Marciano 1995, Achtschin & Marciano 1996, Achtschin *et al.* 1996, Delaney 1996, Banko 1997, Gandini *et al.* 1997a e b, Pinto *et al.* 1997, César-Mendes *et al.* 1998, Gandini & César-Mendes 1998, Gandini *et al.* 1998, Achtschin 1999, Gandini 1999, Gandini *et al.* 1999, Bello *et al.* 2000, Gandini *et al.* 2000, Bello *et al.* 2001, Gandini *et al.* 2001, Graça 2001). Alguns deles prendem-se apenas à citação de alguma ocorrência acrescida de dados sobre dimensões dos cristais. A maior parte dos trabalhos possui caráter mineralógico e cristalquímico, utilizando esses dados para interpretações metalogenéticas dos corpos pegmatíticos, o que permite sua avaliação econômica. Poucos são os de pesquisadores que realizam pesquisas na área da gemologia.

A abordagem das ocorrências de berilo será iniciada com aquelas mais próximas de Belo Horizonte, seguindo-se pelas encontradas nas bacias do rio Doce e do Mucuri, concluindo-se com a do Jequitinhonha.

Em toda a Província Gemológica Oriental, o processo utilizado na extração das gemas é muito primitivo. Na maioria dos corpos pegmatíticos, os instrumentos mais utilizados são picareta, pá, carrinho de pedreiro, ocorrendo ou não o emprego de explosivos. Há algumas lavras semimecanizadas, como em Brejaúba, que conta com sistema de peneiras para lavagem e seleção das amostras; e em Euxenita, que utiliza processo de desmonte hidráulico. A lavra do Tatu utiliza os dois processos combinados. Na mina da Taboca, há um sistema denominado caixa americana, um poço com abertura quadrada, com vários metros de profundidade, geralmente preenchido com água.

Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira

O Distrito de Santa Maria de Itabira abrange uma faixa Norte-Sul, desde Serra Azul, ao Norte, até Rio Piracicaba, ao Sul, na porção Ocidental da Província Gemológica Oriental em Minas Gerais. Os pegmatitos desse distrito são zonados simples, com comprimentos de 50 a 100m e espessura de 5 a 10m. O Pegmatito da Generosa é o maior corpo da região, com mais de 200m de comprimento por 6 a 10m de espessura. Os corpos pegmatíticos são, predominantemente, tabulares e exibem atitude discordante em relação às rochas encaixantes. A mineralogia desses corpos é bastante similar e caracterizada pela presença de microclina branca, bege e verde variedade amazonita, muscovita, biotita, quartzo, minerais do grupo dos nióbio-tantalatos, como euxenita, samarskita e aqueles da série ferrocolumbita-tantalita, monazita, fluorita, os gemas berilo, variedades água-marinha e heliodoro, topázio incolor, branco e azul, além de granadas pertencentes à série piralspita.

Destacam-se, nesse distrito, os campos pegmatíticos de Santa Maria de Itabira-Ferros, especialmente pelas águas-marinhas de cor azul intensa, e o campo pegmatítico de Sabinópolis, por seus gigantescos cristais de berilo (Marciano 1995). Desses campos, será dado destaque a três dentre os 17 pegmatitos já estudados: Lavras Ponte da Raiz e Tatu do campo de Santa Maria de Itabira-Ferros e a Lavra Generosa do campo de Sabinópolis.

Campo Pegmatítico de Santa Maria de Itabira-Ferros

O campo pegmatítico de Santa Maria de Itabira-Ferros, localizado na borda Sudeste da Faixa Araçuaí, exhibe os pegmatitos encaixados de forma discordante em rochas gnáissicas arqueanas do Grupo Guanhães, datadas pelo método Rb/Sr - rocha total, em $2.652 \pm 199\text{Ma}$. A uma distância de 3km ao Norte de Santa Maria de Itabira, aflora o Granito Boa Vista, um biotita-muscovita-granito de grão fino, com foliação metamórfica, de idade proterozóica. A Leste do corpo pegmatítico Ponte da Raiz, ocorre o granito alcalino da Suíte Borrachudos, plúton Açucena, antes Itauninha, também de idade proterozóica, obtido em cristais de zircão pelo método Pb/Pb, em $1.595 \pm 10\text{Ma}$. (Dussin, I. 1994; Dussin, T.M. 1994), onde está localizado o Pegmatito do Tatu. Na região ocorrem, ainda, diques de rochas básicas de aproximadamente, 900Ma. Amostras de muscovita do Pegmatito do Morro Escuro, a cerca de 10km a Noroeste do Pegmatito Ponte da Raiz, e do Pegmatito da Generosa foram datadas pelo método K/Ar em $519,1 \pm 10,1\text{Ma}$. e $529,9 \pm 13,2\text{Ma}$.



Foto 3. Colar em ouro e berilo bruto, azul esverdeado. Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).



respectivamente, estando esses corpos relacionados ao Ciclo Brasileiro (Marciano *et al.* 1993), como todos os demais pegmatitos da Província, já datados no Estado de Minas Gerais.

C a m p o P e g m a t í t i c o d e S a b i n ó p o l i s

No campo pegmatítico de Sabinópolis, afloram os granitos alcalinos proterozóicos pertencentes à Suite dos Granitos Borrachudos, tais como os batólitos graníticos Senhora do Porto e São Félix, a rocha encaixante do Pegmatito da Generosa. Esse granito foi datado em 1.729 ± 12 Ma. pelo método Pb/Pb em cristais de zircão (Dussin, T.M. 1994). Os biotita-gnaisses da Formação Superior do Grupo Guanhães, rochas arqueanas com maior ocorrência na área foram datados pelo método Rb/Sr em $2.666 \pm 0,51$ Ma., sendo considerada idade mínima. O contato entre o Corpo São Félix e as rochas do Grupo Guanhães se dá na borda Ocidental do corpo, por meio de falhas de empurrão e verticalizadas, sendo os demais inferidos. Na área, há pequenas ocorrências dos itabiritos da Formação Média do Grupo Guanhães e, muito mais raramente, rochas gnáissicas da Formação Inferior. O litotipo mais antigo da região é representado pelos granitóides gnaissificados arqueanos do Complexo Basal.

O corpo pegmatítico Ponte da Raiz apresenta forma tabular com ramificações, com comprimento maior do que 100m e espessura de 5 a 10m. Exibe zonas primárias internas e poucas unidades de substituição, sendo classificado como zonado simples.

O pegmatito da Lavra do Tatu é homogêneo, com espessura de 30cm e 2 a 3m de comprimento. Ocorre tanto discordante como concordantemente ao bandamento da encaixante. A mineralogia é constituída pelos minerais essenciais feldspato alcalino, quartzo e muscovita, e pelos acessórios, fluorita, titanita, pirita, granadas, sendo o berilo o principal deles.

O Pegmatito da Generosa é, muitas vezes, referido na literatura como Grota da Generosa. Entre os corpos pegmatíticos da borda ocidental da Província Pegmatítica Oriental em Minas Gerais, esse é muito singular. É o maior pegmatito da região, está encaixado de forma discordante no ortogneisse, regionalmente conhecido como 'granito Borrachudos', tem forma tabular, exibindo ainda apófises, com atitude discordante. Esse pegmatito é zonado simples, mas não apresenta a zona mural ou gráfica, ocorrendo a passagem abrupta da zona marginal ou de borda, de granulação centimétrica fina, à zona intermédia de grandes cristais métricos de feldspato potássico, quartzo e também de berilo.

Nesse distrito, há um pegmatito denominado Talho Aberto, em Rio Piracicaba, onde ocorrem cristais de fenaquita, que alcançam até 20cm. No Pegmatito do Córrego da Derrubada, em Santo Antônio do Itambé, foram retiradas muitas peças de coleção com cristais de berilo azul e amarelo, que chegaram a mais de 100kg.

B e r i l o

O mineral de maior importância nesses corpos pegmatíticos é o berilo, espécie mineral responsável pelos trabalhos de lavra em toda a região do Vale do Alto Rio Doce, de onde são retirados o berilo azul, variedade água-marinha, e o berilo amarelo, variedade heliodoro. Segundo Drumond (1985), a região de Santa Maria de Itabira é responsável pelos gemas de maior intensidade de cor azul dentre os produzidos no Brasil.

Nas lavras Ponte da Raiz, Tatu e Generosa, duas gerações de berilo podem ser discriminadas. Aquela que ocorre na zona gráfica grosseira ou zona intermédia, caracterizada por cristais bem desenvolvidos, que alcançam dimensões decimétricas. São opacos, com coloração azulada ou esverdeada, apresentando-se na forma prismática. A parte central desses cristais contém, por vezes, porções transparentes de água-marinha de qualidade gemológica. Essa geração de berilo associa-se a feldspato potássico pertitzado, quartzo e muscovita em livros de até 15cm. Já os cristais que ocorrem nas unidades de substituição são, via de regra, terminados por pinacóides, raras vezes por dipirâmides, apresentando-se, nesse caso, bem menores do que os anteriores. Esses cristais têm, como paragénese, a albita, freqüentemente na variedade cleavelandita, quartzo, muscovita tardia, topázio, granadas e outros. Os cristais de berilo apresentam-se nas cores azul água-marinha, e amarela heliodoro. A dureza desses minerais é 7,5 e o peso específico varia entre 2,67 a 2,75 (Marciano *et al.* 1994).





Foto 4. Vista parcial da Mina da Generosa (Sabinópolis - Minas Gerais), grande produtora de feldspatos, água-marinhas e minerais raros. (Foto: Antonio Liccardo).

Dados sobre a estrutura cristalina e propriedades físicas das amostras de berilo estudadas são exibidos na Tabela 3.

As análises de difratometria de raios X dos cristais de berilo desses pegmatitos permitem classificá-los como politipos normais (N), de transição (N-T) e tetraédricos (T), em que as substituições de Be por Li são realizadas nas posições tetraédricas.

As análises químicas obtidas possibilitaram o enquadramento dessas amostras entre os do tipo I, ou seja, berilos sem álcalis que apresentam a soma de álcalis total menor do que 1% em peso, e do tipo III, berilos sódicos, sendo o sódio o álcali predominante, com teores variando entre 0,5 e 1% (Hawthorne & Cerny 1977). Utilizando o diagrama Na/Li x Cs (Trueman & Cerny 1982), verifica-se que os pontos relativos às análises desses cristais de berilo localizam-se muito próximos à linha da ordenada, no campo A, que se refere a cristais de berilo oriundos de pegmatitos estéreis e portadores de Be, Nb, Ta, pobres em álcalis raros. Da comparação desses dados com os de outros cristais de berilo procedentes de várias áreas da Província Gemológica Oriental do Brasil (Correia Neves *et al.* 1984), nota-se que os cristais de berilo da porção Ocidental são os mais pobres em álcalis de toda a província.

Todos os cristais de berilo foram estudados por meio da espectroscopia de absorção no infravermelho, com o objetivo principal de caracterizar a composição química dos fluidos existentes na estrutura das amostras, bem como o tipo de água presente nos canais. Análises microtermométricas de inclusões fluidas foram realizadas apenas em uma amostra de berilo do Pegmatito Ponte da Raiz. Por essa metodologia, observou-se que os fluidos primários apresentam composição no sistema $H_2O - CO_2 - NaCl$, sendo os secundários essencialmente aquosos, provavelmente sem CO_2 , podendo conter ainda CH_4 (Marciano *et al.* 1994). A cristalização do berilo ocorreu em um intervalo de temperatura entre 310 e 460°C, que corresponde à temperatura de formação do final da zona mural, início da zona intermédia (Marciano *et al.* 1994).

D i s t r i t o P e g m a t í t i c o d e G o v e r n a d o r V a l a d a r e s

O Distrito pegmatítico de Governador Valadares engloba um grande número de pegmatitos, havendo cerca de uma centena de corpos cadastrados nos trabalhos de Ribeiro (1997) e de Gandini (1999), para o campo pegmatítico de Marilac-Golconda, ocorrendo um número similar no campo pegmatítico de Galiléia-Conselheiro Pena e, aproximadamente, duas dezenas de corpos no campo de São



Tabela 3

Valores de densidade, índice de refração, birrefringência, constantes da cela unitária e cor de cristais de berilo referentes a pegmatitos do campo de Santa Maria de Itabira-Ferros e de Sabinópolis.

Lavra	d	n_g	n_o	Δ	$a_0\text{\AA}$	$c_0\text{\AA}$	Cor
¹ Ponte da Raiz	2,70	1,580	1,574	0,006	9,2150	9,2060	azul
	2,70	1,579	1,574	0,005	9,1900	9,1800	amarela
	-	1,580	1,575	0,005	9,2029	9,1812	esverdeada
¹ Morro Escuro	-	1,578	1,583	0,005	9,1990	9,1610	azul
¹ Cedro	-	1,579	1,585	0,006	9,1804	9,1676	azul
² Tatu*	2,72	1,572	1,580	0,008	9,220	9,206	azul clara
	2,71	1,573	1,580	0,007	9,221	9,206	azul
	2,75	1,580	1,588	0,008	9,222	9,201	azul forte
	2,72	1,573	1,580	0,007	9,220	9,203	esverdeada
³ Generosa	2,78	1,582	1,574	0,008	-	-	azul leitosa
	2,71	1,579	1,573	0,006	-	-	verde azulada

1 e 2 - Santa Maria de Itabira, Marciano (1995); *Graça (2001); 3 - Guanhões, Marciano (1995).

José da Safira. Apesar de pertencentes ao mesmo distrito, os pegmatitos se diferem pela geologia, sendo características as suas encaixantes. Biotita xisto São Tomé é a encaixante mais habitual para todo o distrito, ocorrendo rochas granitóides no campo de Galiléia-Conselheiro Pena e quartzitos no de São José da Safira. Quanto à mineralogia, há uma predominância de berilo e tumalinas em Marilac-Golconda, de minerais de lítio e fosfatos em Galiléia-Conselheiro Pena, e de turmalinas coradas em São José da Safira. Todas as variedades de berilo são encontradas nessa área, com exceção da esmeralda.

Campo Pegmatítico de Marilac - Golconda

Dentre os vários dados já publicados sobre o berilo do campo pegmatítico de Marilac-Golconda, podem ser citados os Correia Neves *et al.* (1984), Marciano (1985), Achtschin & Marciano (1996), Achtschin *et al.* (1996), Gandini *et al.* (1998), Gandini (1999), Bello *et al.* (2000) e Gandini *et al.* (2000).

Foram coletadas 60 amostras de berilo, pertencentes a 18 pegmatitos zonados simples e complexos, procedentes do campo pegmatítico de Marilac. Em relação à coloração dos cristais, são encontradas as variedades azulada escória, a esverdeada escória, as azuis águas-marinhas que são comuns e, raramente, a rosa e a incolor. Nos pegmatitos do Escondido e do Jonas Lima II, foram coletadas amostras de escória uso industrial, água-marinha, morganita e goshenita. Na Tabela 4, encontram-se alguns dados físicos desses cristais de berilo estudados.

Os polítipos de 49 cristais de berilo foram determinados a partir dos parâmetros de cela unitária a_0 e c_0 , obtidos por difratometria de raios X. A razão c_0/a_0 enquadra os cristais de berilo estudados em três tipos distintos, de acordo com Bakakin *et al.* (1970): tipo III n - normal, a minoria, sem substituições catiônicas, os tipos II, a maioria, e tipo I ambos t - tetraédrico., com substituição parcial do berílio por lítio e/ou silício. Podem conter elementos alcalinos em canais, concordando tanto com a maioria dos diagramas de infravermelho que apresentam H₂O-I dominante sobre H₂O-II, bem como os dados ópticos e os valores de peso específico. Com esses dados, pôde-se também constatar que, num mesmo pegmatito, há variações do polítipo do berilo, segundo a zona do pegmatito a que pertence.

Tabela 4

Valores de densidade, índice de refração, birrefringência, constantes da cela unitária e cor de cristais de berilo referentes a pegmatitos do campo de Marilac-Golconda.

Lavra	d	n _e	n _o	Δ	aoÅ.	coÅ.	Cor
Ipê	2,74	1,580	1,585	0,005	9,212	9,208	azul clara
	2,73	1,578	1,585	0,007	9,218	9,211	azul clara
	2,73	1,578	1,585	0,007	9,223	9,207	verde azulada
Ferreirinha I	2,77	1,580	1,585	0,005	9,208	9,198	azul clara
	2,73	1,578	1,583	0,005	9,214	9,205	azul-esverdeada
	2,75	1,578	1,583	0,005	9,214	9,207	amarelo-esverdeada
Olho-de-Gato	2,77	1,582	1,588	0,006	9,209	9,202	azul clara
	2,78	1,578	1,585	0,007	9,211	9,206	verde-amarelada
Toninho	2,74	1,580	1,587	0,007	9,213	9,210	azul clara
José Pereira	2,76	1,580	1,586	0,006	9,204	9,204	azul clara
	2,85	1,581	1,590	0,009	9,212	9,215	rosa
	2,81	1,578	1,583	0,005	9,208	9,202	azul-esverdeada
	2,72	1,578	1,585	0,007	9,218	9,203	azul
Marcial	2,71	1,577	1,583	0,006	9,207	9,205	leitosa
Farias Jonas Lima*	-	-	-	-	9,206	9,198	-

1 - Governador Valadares *Correia Neves *et al.* (1984); Gandini (1999).

As análises químicas de 60 cristais de berilo, todos pertencentes ao campo de Marilac, foram realizadas por fluorescência de raios X, ICP e titulometria. A relação Na/Li x Cs do diagrama de Trueman & Cerny (1982) permite caracterizar dois grupos de pegmatitos: um mais abundante, do tipo estéril, portador de Be, Nb, Ta e pobre em álcalis raros, e o outro, com Be, Nb e Ta, enriquecido em álcalis raros Gandini 1999.

O quimismo da fase fluida do berilo foi identificado por três metodologias distintas, a saber: microtermometria, espectroscopia de absorção no infravermelho FTIR (infravermelho por transformada de Fourier) em 60 amostras, basicamente, para a identificação dos grupamentos moleculares presentes nas inclusões fluidas de berilo, tais como água do tipo I e II, gás carbônico e hidrocarboneto, fornecendo também dados para determinação dos politipos de berilo e espectroscopia micro-Raman para identificação do N₂. A primeira e a última metodologia só foram empregadas para cristais de berilo do Pegmatito do Ipê.

Resultados de estudos de inclusões fluidas em amostras de berilo do Pegmatito do Ipê da zona gráfica, intermediária e de um corpo de substituição são discutidos por Bello *et al.* (2001) (Tabela 5). Foi observada uma predominância de inclusões fluidas bifásicas, essencialmente aquosas, com formas de cristais negativos de seção retangular. Na maioria dos casos, orientam-se paralelamente ao eixo c do berilo hospedeiro, embora também ocorram inclusões perpendiculares ou inclinadas em relação a esse eixo. Também foram observadas inclusões trifásicas a multifásicas, compostas por H₂O l., H₂O v. e fases sólidas anisótropas, ocasionais. Planos de inclusões fluidas distribuídas em fraturas cicatrizadas internas ao cristal hospedeiro, sugerindo uma origem pseudo-secundária, foram também identificados. As inclusões estudadas possuem dimensões localizadas na faixa de 15 a 50 μm. A microtermometria revelou tratar-se, na maioria das vezes, de inclusões compostas essencialmente por soluções aquosas de baixa salinidade. Outros métodos de análise mostraram a existência de pequenas quantidades de CO₂ e, raramente, CH₄ espectroscopia de absorção no infravermelho, ocorrendo o CO₂ em maior quantidade na amostra proveniente do corpo de substituição, com CO₂ e N₂ presentes, apenas, em inclusões dos cristais de berilo da zona gráfica.



Tabela 5

Dados obtidos a partir de análises por microtermometria, espectroscopia de absorção no infravermelho e espectroscopia micro-Raman em inclusões fluidas em amostras de berilo do pegmatito Ipê.

Zonas	Microtermometria			FTIR	Micro-Raman
	Te°C.	Tfg°C.	Th°C.		
Zona Gráfica	-25 a -19 -36 a -30 -43 a -37	-3,5 a -2,0	200 a 230	H ₂ O CH ₄ fraco CO ₂	H ₂ O CO ₂ N ₂
Zona Intermediária	-41 a -35	-3,5 a -2,5	180 a 220 130 a 210*	H ₂ O CH ₄ fraco -	CO ₂ H ₂ O N ₂ CO ₂ tr.*
Corpo de Substituição	-23 a -19 -47 a -39	-4,0 a -2,5	180 a 220 100 a 270*	H ₂ O forte CH ₄ forte CO ₂ forte	H ₂ O

* Inclusões pseudo-secundárias



Foto 5. Água-marinha de cor azul intenso e lapidada na forma oval.. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

As temperaturas eutéticas e dados de espectroscopia de absorção no infravermelho e micro-Raman de inclusões das amostras do Pegmatito do Ipê sugerem uma evolução dos fluidos a partir de sistemas com Na^+ , K^+ , e possíveis quantidades de Fe^{2+} e $\text{Fe}^{3+} \pm \text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$, para soluções mais ricas em Ca^{2+} , com maiores quantidades de CO_2 . As temperaturas de homogeneização corroboram essa hipótese, também sugerindo que as inclusões das zonas gráfica e intermediária foram reequilibradas pelas soluções posteriores.

Campo Pegmatítico de Galiléia - Conselheiro Pena

Os pegmatitos que apresentam interesse econômico, pertencentes ao campo pegmatítico de Galiléia-Conselheiro Pena (Correia Neves *et al.* 1986) estão encaixados, concordantemente, no micaxisto da Formação São Tomé. São zonados complexos, com maior grau de diferenciação quando comparados aos do campo pegmatítico de Marilac. Esses corpos se sobressaem aos de outros campos da Província Gemológica Oriental, devido à presença de minerais da classe dos fosfatos, principalmente os de lítio e manganês, como trifilita, purpurita, heterosita e dos de alumínio, com destaque para os belos cristais de brasilianita, conhecidos internacionalmente. Outros acessórios comuns são: espodumênio, amblygonita, turmalinas coradas, topázio, sulfetos, nióbio-tantalatos e cassiterita. Os dados mineralógicos de berilo desse campo estão representados na Tabela 6.

As primeiras análises de berilo pertencentes a esse campo foram obtidas por Correia Neves *et al.* (1984), com o objetivo de classificação geoquímica tanto dos pegmatitos como dos minerais presentes nesses corpos, sem que houvesse qualquer ênfase gemológica.

Tabela 6

Principais características mineralógicas de cristais de berilo estudados do campo pegmatítico de Galiléia-Conselheiro Pena.

Lavra	d	n_E/n_A	n_B	n_O/n_T	Δ	$a_0 \text{ \AA}$	$c_0 \text{ \AA}$	Cor
¹ Alcindo	2,69	-	-	-	-	9,211	9,215	azul-esv-clara
¹ Urucum	2,70	-	-	-	-	9,207	9,227	-
¹ Enio	2,65	-	-	-	-	9,213	9,208	-
¹ Barra da Penha	2,66	-	-	-	-	9,211	9,208	-
² Morganita	-	1,580	-	1,589	0,009	9,2073	9,1922	incolor
	-	1,580	-	1,588	0,008	9,2161	9,2347	azul
	-	1,590	1,594	1,599	0,009	9,2190	9,2383	rosa
³ Piano	-	1,573	-	1,579	0,006	9,2095	9,1991	azul clara
	-	1,572	-	1,579	0,007	9,2067	9,1786	azul-leitosa
⁴ Vala Grande	-	1,573	-	1,580	0,007	9,1937	9,1911	azul-leitosa
	-	1,574	-	1,580	0,006	9,1998	9,1984	azul clara
	-	1,570	-	1,578	0,008	9,1999	9,1943	esverdeada

1- Galiléia Correia Neves *et al.* (1984); 2 - Conselheiro Pena e 3 - Divino das Laranjeiras Gandini *et al.* (1997)a, Gandini *et al.* (1997)b, Gandini & César-Mendes (1998) e Gandini *et al.* (1999); 4 - Resplendor Gandini & César-Mendes (1998).

Campo Pegmatítico de São José da Safira

O campo pegmatítico de São José da Safira é famoso pelas ocorrências de turmalinas coradas. Entretanto, nele também podem ser encontrados cristais de berilo leitoso, água-marinha emorganita. As amostras referenciadas neste capítulo são oriundas da Mina do Cruzeiro (César-Mendes 1995) (Tabela 7), um pegmatito zonado complexo, encaixado, discordantemente, em rochas quartzíticas da formação São Tomé do Grupo Rio Doce.

Nesse campo, há outras minas que apresentam ocorrências de berilo, principalmente cristais euédricos, com formas mais raras, comercializados como peças de coleção.

Tabela 7

Principais características mineralógicas de cristais de berilos estudados de São José da Safira.

Lavra	d	n_x/n_o	n_y	n_o/n_y	Δ	$a_o \text{ \AA}$	$c_o \text{ \AA}$	Cor
Cruzeiro	-	1,578	-	1,584	0,006	9,2130	9,1750	azulada
	-	1,582	-	1,590	0,008	9,2160	9,2280	rosa

Distrito Pegmatítico de Padre Paraíso

Os pegmatitos estudados nesse distrito ocorrem em Padre Paraíso e em Ponto Marambaia. Apresentam formas tabulares a amebóides, com dimensões variadas e a espessura decimétrica a métrica, alcançando dezenas de metros de extensão. Os corpos, em sua maioria, são zonados simples associados ao granito Caladão e ao charnockito Paraíso (Pinto *et al.* 1997), pertencentes à Suite Intrusiva Aimorés, que corresponde à Suite G5, segundo Pedrosa-Soares *et al.* (1999). Entre os acessórios, o topázio incolor, amarelo e azul, e berilo água-marinha, heliodoro e goshenita são os de maior destaques. A área em questão é muito conhecida pelas ocorrências de crisoberilo e alexandrita, não sendo, entretanto, encontrados minerais de lítio, turmalinas coradas ou espodumênio. Fato que merece ser destacado é a ocorrência de berilo e topázio em um mesmo pegmatito, porém nunca em um mesmo corpo de substituição (Proctor 1984).

Vinte amostras de berilo, sendo doze de qualidade gemológica, foram estudadas por Achtschin (1999). A procedência das amostras e os demais dados gemológicos constam na Tabela 8.

As amostras de berilo apresentam, principalmente, estrutura politípica do tipo t (44,44%), seguida por aqueles que se aproximam muito do politipo n (16,67%) e outros de transição entre n - t (27,78%), sendo os octaédricos - o (11,11%) os mais raros. Achtschin (1999) chama a atenção para o fato de não existir correlação entre os politipos e as cores exibidas pelas amostras de berilo.

Várias metodologias analíticas foram empregadas no intuito de serem conhecidos os fatores determinantes de sua cor. Para os vinte cristais de berilo deste campo, foram considerados os seguintes óxidos: FeO , TiO_2 , MnO , MgO , Cr_2O_3 e V_2O_5 . A amostra de cor verde apresenta maior quantidade desses óxidos, sendo mais significativos o FeO , Cr_2O_3 , V_2O_5 e MnO . A variedade amarela exibe percentuais mais elevados em FeO e V_2O_5 e reduzidos valores dos demais elementos. A presença de maior quantidade percentual de FeO associado à pequenas quantidades de Cr_2O_3 , V_2O_5 , TiO_2 , MnO e MgO são características da cor azul. Foram ainda utilizadas as razões químicas $\text{V}_2\text{O}_5/\text{FeO}$, $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ e $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, notando-se claramente a maior influência das duas últimas como discriminadoras das cores.

Tabela 8

Valores de densidade, índice de refração, birrefringência, constantes da cela unitária e cor de cristais de berilo referentes a pegmatitos do Distrito de Padre Paraíso (Achtschin, 1999).

Lavra	d	n_E/n_O	n_β	n_O/n_T	Δ	$a_0\text{\AA.}$	$c_0\text{\AA.}$	Cor
Duas Barras	2,68 2,65	1,565 -	- -	1,570 -	0,005 -	9,171 9,168	9,176 9,185	azul incolor
Zé do Bananal	2,29	1,565	-	1,570	0,005	9,178	9,152	azul clara
Leondinhas	2,73	1,563	1,567	1,570	0,007	9,157	9,154	verde
Abílio Preto	2,44 2,88 2,87	1,564 1,567 1,565	- 1,572 -	1,570 1,575 1,570	0,006 0,008 0,005	9,191 9,168 9,183	9,180 9,129 9,174	verde clara verde amarelada amarela



Foto 6. Cristal de berilo verde-azulado, proveniente de Araçuaí, com 12cm de altura. Coleção do Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas de Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

Distrito Pegmatítico de Araçuaí

O distrito pegmatítico de Araçuaí é constituído por cinco campos (Lobato & Pedrosa-Soares 1993), com características que enquadram os pegmatitos nas classes e tipos como indicados a seguir:

- I - Laje Velha-Salinas;
- II - Coronel Murta-Virgem da Lapa; classe elementos-raros, tipo berilífero-turmalínífero
- III - Itinga; classe elementos-raros, tipo estanífero-litínífero
- IV - Ribeirão da Folha; classe elementos-raros do tipo turmalíníferos
- V - Capelinha; classe muscovita, tipo berilífero.

Amostras oriundas de três desses campos foram estudadas pelos vários autores citados na Tabela 9, os quais nem sempre obtiveram os dados de todos os parâmetros mencionados. Das 17 amostras, apenas 9 foram estudadas do ponto de vista da estrutura cristalina e da composição química, encontrando-se, portanto, ausentes os valores para os índices de refração e peso específico.

Tabela 9 Valores de densidade, índice de refração, birrefringência, constantes da cela unitária e cor de cristais de berilo referentes a pegmatitos do distrito de Araçuaí.

Lavra	d	n_e/n_o	n_β	n_o/n_γ	Δ	$a_0\text{\AA.}$	$c_0\text{\AA.}$	Cor
¹ Lava Roupa L. Ramiro	-	-	-	-	-	9,208	9,223	-
¹ Lava Roupa Cariba	-	-	-	-	-	9,215	9,220	-
¹ Salinas ^e	-	1,583	-	1,590	0,007	9,2155	9,2291	azul clara
	-	1,587	-	1,595	0,008	9,2097	9,2337	rosa
	-	1,589	-	1,594	0,005	9,218	9,2301	incolor
² João Gonçalves	-	-	-	-	-	9,258	9,186	rosa
	-	-	-	-	-	9,220	9,225	rosa clara
² Bananal	-	-	-	-	-	9,215	9,273	azul leitosa
³ Frade	-	-	-	-	-	9,227	9,256	azul-esv.
³ Olho d'Água	-	-	-	-	-	9,214	9,213	-
³ Lagoa da Cruz*	-	1,573	-	1,579	0,006	9,2083	9,2008	azul
	-	1,573	-	1,580	0,007	9,2257	9,1994	rosa
⁴ Limoeiro	-	-	-	-	-	9,207	9,230	-
⁵ Urubu*	-	1,570	-	1,579	0,009	9,2109	9,1951	amarelada
	-	1,573	-	1,580	0,007	9,2031	9,1976	rosa
	-	-	-	-	-	9,223	9,226	azul-leitosa
⁵ Lavra do Carlao ⁺	-	1,585	-	1,590	0,005	9,267 ⁺⁺	9,249 ⁺	rosa

1- Salinas; 2- Rubelita; 3- Coronel Murta; 4- Virgem da Lapa; 5- Araçuaí Correia Neves *et al.* (1984);
#- Aurisicchio *et al.* (1988); *- Gandini *et al.* (1999); +- Castañeda *et al.* (2000),
++ informação verbal.



Foto 7. Cristal de morganita medindo 11 cm e proveniente de Araçuaí - MG. Coleção do Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas de Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

Os pegmatitos são tabulares a lenticulares, zonados simples ou complexos, encaixados em metamorfitos ou granitos da suíte G4, tipo S. Esses corpos pegmatíticos apresentam grandes dimensões, atingindo centenas de metros de comprimento por dezenas de metros de espessura. Essa região é conhecida como Vale do Jequitinhonha, e na margem de um de seus afluentes, o rio Piauí na Mina do Maxixe, foram encontrados cristais de berilo de cor azul escuro que apresentam uma perda da cor quando expostos à luz por um longo período de tempo. Devido a essa peculiaridade, todas as águas-marinhas que perdem a cor são denominadas tipo Maxixe.

Segundo Proctor (1984), a primeira lavra trabalhada nessa região foi a do Frade, localizada em Coronel Murta que, no auge da produção, alcançou a cifra de 200kg de água-marinha, dos quais, 20% apresentavam qualidade gemológica.

Tabela 10

Valores de densidade, índices de refração, birrefringência, constantes da cela unitária e cor de berilo referentes ao pegmatito Angico, Medina.

Lavra	d	n_c	n_o	Δ	$a_o\text{\AA}$	$c_o\text{\AA}$	Cor
Angico	-	1,564	1,570	0,006	9,2275	9,1916	azul forte
	-	1,565	1,570	0,005	9,2412	9,1954	esverdeada

Distrito Pegmatítico de Medina - Pedra Azul

Os pegmatitos do distrito pegmatítico de Medina-Pedra Azul pertencem à classe elementos-raros e são especialmente mineralizados a berilo. As rochas encaixantes são granitóides da suíte G5 (Lobato & Pedrosa-Soares 1993).

O ano de 1983 foi o período de maior produção, tendo sido encontradas várias águas-marinhas, num total de 3.000ct. A maior pedra lapidada e de coloração mais intensa pertence à coleção de Kalil Elawar, foi talhada com forma octagonal, com 107ct.

Os dados das amostras estudadas da Lavra do Angico (Gandini *et al.* 1999), Medina, encontram-se na Tabela 10.

Os vários distritos abordados neste trabalho são indicativos dos diferentes ambientes onde se encontram as gemas do grupo do berilo na Província Gemológica Oriental do Brasil, em Minas Gerais, principalmente aquelas de cor azul, verde-clara, amarela, rosa e incolor. Existem depósitos diretamente associadas aos corpos graníticos, como os de Marambaia e alguns de Conselheiro Pena-Galiléia, enquanto outros vêm sendo considerados de origem anatética, como no Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira (Marciano 1995). Em algumas jazidas, os estudos realizados não foram suficientes para a elucidação da gênese, como é o caso do campo pegmatítico de Marilac (Gandini 1999).

Os trabalhos desenvolvidos com amostras gemológicas são ainda muito incipientes e raros. Há apenas dois trabalhos, entre os citados, que tratam de pesquisa específica sobre a cor nos berilos das variedades água-marinha azul e verde-clara, heliodoro e goshenita.

Graça (2001) conseguiu demonstrar que existe uma correlação geoquímica específica entre o magnésio e o alumínio para cristais de berilo azuis e verdes, além da já conhecida causa de cor pelos íons cromóforos, como Fe^{2+} e Fe^{3+} . Achtschin (1999) observou a influência causada pelo vanádio, cromo e manganês, entre outros, na determinação da cor. O primeiro autor trabalhou com amostras da lavra do Tatu, em Santa Maria de Itabira, enquanto o segundo utilizou diversos cristais de berilo de depósitos localizados em Marambaia e Padre Paraíso.

A Universidade Federal de Minas Gerais possui um laboratório destinado a tratamento de cor por irradiação e a Universidade Federal de Ouro Preto utiliza um forno de aquecimento para o estudo da cor em gemas. Ainda há muito a conhecer sobre as variedades de berilo oriundas dos depósitos de Minas Gerais; entretanto, os conhecimentos sobre a sua qualidade e quantidade são bastante seguros.



Foto 8. Colar em ouro e cristais facetados de água-marinha. Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).



Bibliografia Consultada

- Achtschin, A.B. 1999. Caracterização geológica, mineralógica e geoquímica de pegmatitos do distrito Pegmatítica de Padre Paraíso, Minas Gerais e suas variedades de berilo. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Dissertação de Mestrado, 120p.
- Achtschin, A.B. & Marciano, V.R.P.R.O. 1996. Utilização do berilo na caracterização genética de corpos pegmatíticos da faixa Sabinópolis - Governador Valadares, MG., In: Semana de Iniciação Científica, V, Belo Horizonte, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 201.
- Achtschin, A.B.; Costa, K. De V.; Reis, L.B. 1996. Controle litoestrutural do Pegmatito Ipê. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Trabalho de Graduação, 90p.
- Alecrim, J.D. 1982. Recursos minerais do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, METAMIG. 299p.
- Anderson, B.W. 1984. A identificação das gemas. Rio de Janeiro. Ao Livro Técnico. 460p.
- Andersson, L.O. 1979. The difference between Maxixe beryl and Maxixe-type beryl: na electron paramagnetic resonance investigation. *Journal of Gemmology*, 16(5): 313-317.
- Aurisicchio, C.; Fioravante, G.; Grubessi, O.; Zanazzi, P.F. 1988. Reappraisal of the crystal chemistry of beryl. *American Mineralogist*, 73: 826 - 837.
- Bakakin, V.V.; Rylov, G.M.; Belov, N.V. 1970. X-ray diffraction data for identification of beryl-isomorphs. *Geochemistry International*, 11: 924-933.
- Banko, A.G. 1997. FTIR-spektroskopische untersuchungen na beryllen unterschiedlicher herkunft, sowie die geologische, mineralogische und gemmologische charakterisierung der diamanten des Espinhaço-Gebirges Minas Gerais, Brasilien. Wien., Institut für Mineralogie und Kristallographie, Universität Wien, Alemanha. Tese de Doutorado, 185p.
- Bello, R.M. Da S.; Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Fuzikawa, K.; Carvalho, F.M.S.; Svisero, D.P.; Souza, L.A.C.; Dantas, M.S.S.; 2000. Caracterização mineralógica e composição química das inclusões fluidas de berilo do Pegmatito Ipê, município de Governador Valadares, Minas Gerais. *Geonomos*, 8(2): 45-54.
- Bello, R.M.S.; Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Fuzikawa, K.; Svisero, D.P.; Souza, L.A.S. 2001. Inclusões fluidas em berilo do Pegmatito Ipê, município de Governador Valadares, Minas Gerais, Brasil. In: Semana de Geoquímica, 12/ Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 6., Algarve, 2001. Actas. p. 62-65.
- Betekhtin, A.G. s.d. A course of mineralogy. Moscow, Peace Publishers. 642p.
- Beus, A.A. 1966. Geochemistry of beryllium and genetic types of beryllium deposits. San Francisco, W. H. Freeman and Co. 401p.
- Branco, P. de M. 1984. Glossário gemológico. Porto Alegre, Editora da Universidade. 203p.
- Brown, G. 1993. Maxixe-type beryls: ghosts from the past. *Australian Gemmologist*, 18(7): 215-221.
- Cassedanne, J.P. 1991. Tipologia das jazidas brasileiras de gemas. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T.de; Coelho, C.E.S. 1991. Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CPRM. v. 4, p. 17-36.
- César-Mendes, J. 1995. Mineralogia e gênese dos pegmatitos turmaliníferos da Mina do Cruzeiro, São José da Safira, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 260p.
- César-Mendes, J.; Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Svisero, D.P. 1998. Correlações genéticas entre berilos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. *Revista Escola de Minas*, 51(1): 34-39.
- Castañeda, C.; Krambrock, K.; Pinheiro, M.V.B.; Botelho, N.F.; Pedrosa-Soares, A.C. 2000. Caracterização química, óptica e magnética de morganita natural e tratada. In: UFOP, Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 1, Ouro Preto, Resumos, p14.
- Correia Neves, J.M.; Monteiro, R.L.B.B.; Dutra, C.V. 1984. Composição químicas de berilos pegmatíticos do Brasil e seu significado petrológico e metalogenético. *Revista Brasileira de Geociências*, 14(3): 137-146.
- Correia Neves, J.M.; Pedrosa Soares, A.C.; Marciano, V.R.P.R.O. 1986. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1): 106-118.
- Crowson, P. 1994. Minerals Handbook 1994-95, statistics and analyses of the world's minerals industry. USA, Stockton Press, 328p.
- Dana, J.D.; Hurlbut JR., C.S. 1976. Silicatos. Manual de mineralogia. 3. ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v. 2, p. 423-564.
- Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. 1981. Minerais constituintes das rochas - uma introdução. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 559p.
- Delaney, P.J.V. 1996. Gemstone of Brazil - geology and occurrences. Ouro Preto, Editora REM. 125p.
- Drumond, J.B.V. 1985. Ipatinga - Folha SE 23-Z-D, Região Sudeste. Projeto mapas carta de previsão de recursos minerais; carta de previsão para planejamento de ações governamentais. DNPM, 15p.
- Dussin, I.A. 1994. Evolution structurale de la region de l'Espinhaço Méridionale, bordure sud-est du Cartón São Francisco Brésil. Tectoniques superposes au Proterozoïque. Orleans, 200p. Tese - Doutorado. - Université D'Orléans.
- Dussin, T.M. 1994. Associations volcano-plutonique de l'Espinhaço Meridional SE - Brasil. Un exemple d'évolution de la croûte protérozoïque. Université D'Orléans, Orleans, Tese de Doutorado, 177p.
- Flanigen, E.M.; Breck, D.W.; Mumbach, N.R.; Taylor, A.M. 1967. Characteristics of synthetic emeralds. *American Mineralogist*, 52(5/6): 744-772.
- Foord, E.E.; Mills, B.A. 1978. Biaxiality in 'isometric' and 'dimetric' crystals. *American Mineralogist*, 63(3/4): 316-325.
- Gaines, R.V.; Skinner, H.C.W.; Foord, E.E.; Mason, B.; Rosenzweig, A. 1997. Dana's new mineralogy. 8. ed. New York, John Wiley & Sons, 1819p.
- Gandini, A.L. 1999. Aspectos da Mineralogia, Geoquímica, Gênese e Potencialidade Econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese - Doutorado, 261p.





- Gandini, A.L. & César-Mendes, J. 1998. Mineralogia de berilos da borda leste da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. In: Congresso Latino Americano de Geologia, 10., Buenos Aires, 1998. Actas. 2: 205-210.
- Gandini, A.L.; César-Mendes, J.; Bello, R.M.S.; Marciano, V.R.P.R.O.; Fuzikawa, K.; Pimenta, M.A.; Svisero, D.P. 1997a. Quimismo das inclusões fluidas de berilos da borda leste da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. In: Semana de Geoquímica 10/ Congresso De Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 4, Braga, Actas, 183-186.
- Gandini, A.L.; César-Mendes, J.; Marciano, V.R.P.R.O. 1999. Geoquímica de berilos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. In: Congresso De Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa 5/ Congresso Brasileiro de Geoquímica, 7, Porto Seguro, Anais, 262-264.
- Gandini, A.L.; César-Mendes, J.; Svisero, D.P. 1997b. Dados mineralógicos de berilos de três pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. In: Semana de Geoquímica 10/ Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 4, Braga, Actas., 187-190.
- Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Bello, R.M.S.; Svisero, D.P. 2000. Ipê Pegmatite. In: César-Mendes, J., Gandini, A.L. eds., 2000. Guide to the major colored gemstone deposits in the vicinity of Belo Horizonte, Minas Gerais State, Brazil. In: SBG, Post-Congress Field Trip. International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, Field Trip Aft 20, 36-40.
- Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Carvalho, F.M.S.; Bello, R.M.S.; Oliveira, R.C.; Souza, L.A.S.; Svisero, D.P.; Cipriano, R.A.S.; Figueiredo JR., J.C.D.A. 2001. Geoquímica do berilo do Campo pegmatítico de Marilac, Governador Valadares - Minas Gerais, Brasil. In: Semana De Geoquímica 12/ Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 6, Algarve, Actas, 66-69.
- Gandini, A.L.; Marciano, V.R.P.R.O.; Svisero, D.P. 1998. Geoquímica de berilos do Campo Pegmatíticos de Marilac, Governador Valadares, Minas Gerais - Brasil. In: Latin American Conference On Geosciences, 16, Bayreuth, Actas, 40-41.
- Garibaldi, E. 1994. Ocorrências gemológicas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Real, 116p.
- Gonsalves, A.D. 1949. As principais pedras e elementos outros considerados como preciosos. In: As pedras preciosas na economia nacional. Rio de Janeiro, Gráfica Olímpio Editora. 239p.
- Graça, L.M. 2001. Caracterização cristaloquímica da água-marinha da lavra do Tatu, Itauninha, Minas Gerais. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 51p.
- Günther, B. 1988. Tables of gemstone identification. Kirschweiler. Verlagsbuchhandlung Elizabeth Lenzen, 162p.
- Hawthorne, F.C. & Cern, P. 1977. The alkali-metal positions in Cs-Li beryl. Canadian Mineralogist, 15(3): 414-421.
- Hurlbut Jr., C.S. & Switzer, G.S. 1979. Descriptive gemology. In: Gemology. New York, John Wiley & Sons. p. 124-220.
- Issa Filho, A.; Moura, O.J.M. De; Fanton, J.J. 1980. Reconhecimento de pegmatitos da Província Oriental Brasileira entre Aimorés e Itambacuri - MG. In: SBG - Núcleo Santa Catarina, Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Balneário de Camboriú, Anais, 3:1552-1563.
- Klein, C. & Hurlbut JR., C.S. 1985. Manual of mineralogy. 20. ed. New York, John Wiley & Sons. 596p.
- Lobato L.M. & Pedrosa-Soares, A.C. 1993. Síntese dos recursos minerais do Cráton São Francisco e Faixas Marginais em Minas Gerais. Geonomos, 1(10): 51 - 64.
- Marciano, V.R.P. da R.O. 1985. Contribuição ao estudo da mineralogia e geoquímica de pegmatitos da região de Governador Valadares, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação - Mestrado, 213p.
- MARCIANO, V.R.P. Da R.O. 1995. O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG: mineralogia, geoquímica e zoneografia. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 216p.
- Marciano, V.R.P.R.O.; Rios, F.J.; Achtschin, A.B.; Correia Neves, J.M.; Svisero, D.P. 1994. Berilos de pegmatitos de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais - Brasil. Geonomos, 2(2): 41-50.
- Marciano, V.R.P. da R.O.; Correia Neves, J.M.; Svisero, D.P.; Quintão, N.H.; Silva, L.C.T. 1992. Pegmatitos da borda Sudeste do Cráton Sanfranciscano, em Minas Gerais: localização, características morfo-estruturais e mineralogia. Revista Escola de Minas, 45(1/2): 199-200.
- Marciano, V.R.P.R.O.; Svisero, D.P.; Correia Neves, J.M. 1993. Dados geocronológicos de pegmatitos da borda oriental do Cráton do São Francisco. In: SBG - Núcleo Bahia-Sergipe, Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco, 2, Salvador, Anais, 362-365.
- Mauriño, C.D. 1976. Silicatos. In: Iniciación práctica a la mineralogía. Madrid, Editorial Alhambra. p. 366-511.
- Metamig-Metais de Minas Gerais. 1987. Projeto Pegmatitos: bases para a pesquisa dos pegmatitos graníticos. Belo Horizonte, METAMIG. v. 1, 127p.
- Morteani, G.; Preinfalk, C.; Horn, A. 1995. Trace element contents in K-feldspar and white mica from pegmatites from the eastern pegmatite province of Brazil Minas Gerais, Espírito Santo and southern Bahia States. SGA - Tagung, Praga. 4p.
- Moura, O.J.coord. 1981. Gems from Brazil. Belo Horizonte, METAMIG - Metais de Minas Gerais S/A, 68p.
- Pedrosa-Soares, A.C.; Wiedmann, C.; Fernandes, M.L.S.; Faria, L.F.; Ferreira, J.C.H. 1999. Geotectonic significance of the neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuaí Belt, eastern Brazil: A model and pertinent questions. Revista Brasileira de Geociências. 29(1): 59-66.
- Perkins, P.H. 1981. Gemstone of the bible. 2. ed. Georgia, Library of Congress. 142p.
- Pinto, C.P.; Drumond, J.B.V.; Féboli, W.L. Et AL. coords. 1997. Projeto Leste - MG. Geologia, Etapa 1, Texto explicativo. Belo Horizonte, CPRM/SEME/COMIG. no prelo.
- Proctor, K. 1984. Gem pegmatites of Minas Gerais, Brazil: exploration, occurrence, and aquamarine deposits. Gems & Gemology, 20(2): 78-100.
- Ribeiro, J.H. coord. 1997. Projeto Leste - MG, Folha Marilac SE.23-Z-B-VI - Escala 1:100.000. Belo Horizonte, SEME/COMIG/CPRM. 48p.
- Roberts, W.L.; Rapp Jr., G.R.; Weber, J. 1974. Encyclopedia of minerals. New York, Van Nostrand Reinhold. 693p.
- Santos, E.G. dos 1985. Mineralogia e zoneografia do Campo Pegmatítico da Golconda - Município de Governador Valadares - MG. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Dissertação - Mestrado, 96p.
- Sauer, J.R. 1982. Berilos. In: Brasil, paraíso de pedras preciosas. São Paulo, Gráfica Editora Hamburg. p. 19-34.
- Schumann, W. 1992. Gemas do Mundo. 7. ed. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico. p. 254.
- Schwarz, D. 1987. A Mineralogia Do Berilo E Da Esmeralda. In: Esmeraldas: Inclusões em gemas. Ouro Preto. Imprensa Universitária da UFOP. p. 3-58.
- Sinkankas, J. 1981. Emerald and other beryls. Pennsylvania, Chilton Book Company. 665p.
- Tröger, W.E. 1979. Optical determination of rock forming minerals. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 188p.
- Trueman, D.L. & Cern, P. 1982. Exploration for rare element granitic pegmatites. In: Cern, P. ed. Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg, Mineralogical Association of Canada. p. 463-493. Short course handbook, v. 8.
- Webster, R. 1980. Gems; their sources, description and identification. London, Butterworths. 938p.
- Wood, D.L. & Nassau, K. 1968. The characterization of beryl and emerald by visible and infrared absorption spectroscopy. American Mineralogist, 53(5/6): 777-800.

capítulo seis

Esmeralda

Júlio César - Mendes
Maria Sílvia Carvalho Barbosa

I n t r o d u ç ã o

A história da esmeralda no Brasil é muito interessante, pois os bandeirantes atravessaram grandes áreas no interior do país à procura de ouro, diamante e esmeralda desde o século XVII. Apesar da intensa procura, a esmeralda nunca foi encontrada no Brasil Colônia.

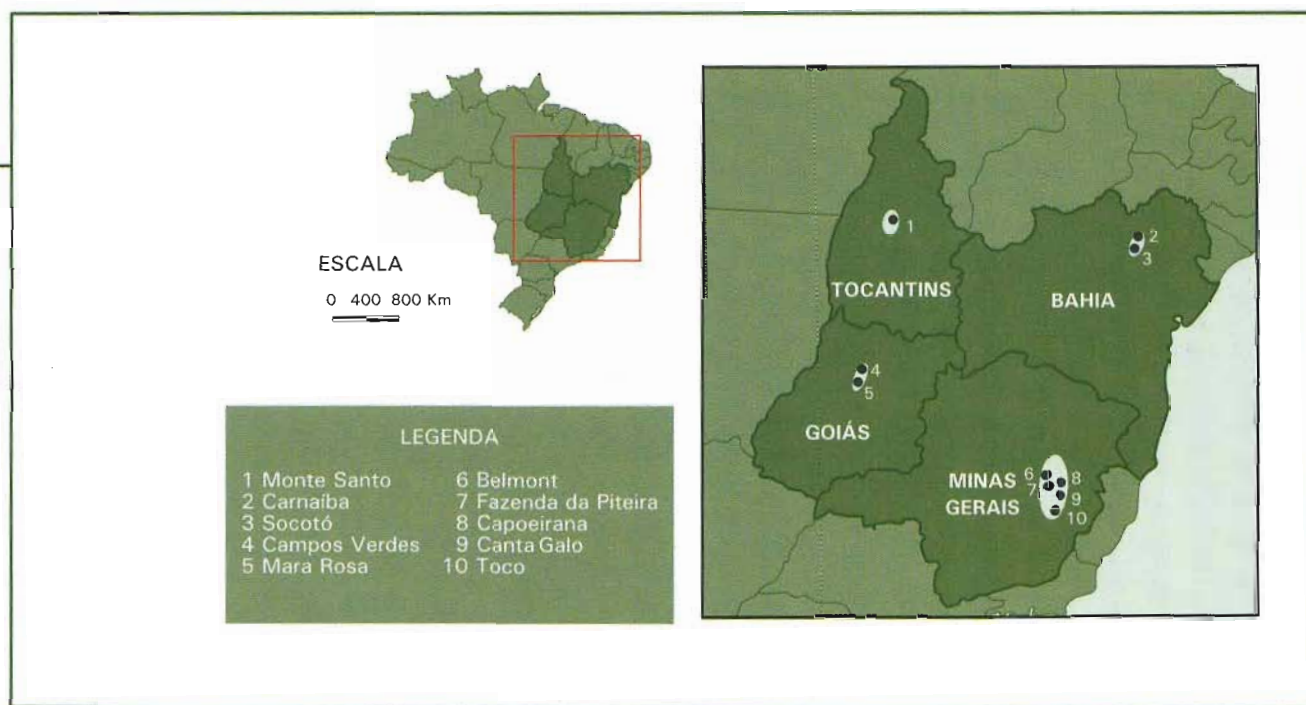
A partir da década de 60, do século XX, aconteceu uma série de descobertas casuais. A primeira foi em 1963, em Salininha (Bahia), área hoje inundada pela Barragem de Sobradinho. A partir daí, sucedeu-se uma série de grandes achados (Figura 1), podendo ser citados os de Carnaíba (Bahia), 1964; Itabira (Minas Gerais), 1978; Santa Terezinha de Goiás - atual Campos Verdes (Goiás), 1981; Socotó (Bahia) 1983; e Capoeirana (Minas Gerais) ,1988 (César-Mendes 1989). Excetuando-se o Estado de Minas Gerais, a última jazida de esmeralda encontrada no Brasil foi a de Monte Santo, Tocantins, em 1997, quando um garoto de 12 anos que estava trabalhando numa plantação de banana e precisava abrir um pequeno poço para o suprimento de água, encontrou algumas pedras verdes as quais, após serem analisadas, verificou-se tratar de esmeraldas. Entre 1995 e 1999, houve uma série de novas descobertas em Minas Gerais, dentre elas, a do Garimpo do Toco e da Mina de Santa Galo, no município de Nova Era/São Domingos do Prata. A Mineração Santa Galo deverá iniciar a exploração numa área situada a 13km a Sudoeste de Nova Era, em rocha alterada (colúvio) e inalterada, produzindo esmeralda de excelente qualidade gemológica e em condições geológicas muito similares às encontradas na Mina Belmont, em Itabira (César-Mendes & Ferreira Jr 1998). A última grande descoberta de esmeralda, no Estado de Minas Gerais (Jazida da Fazenda das Piteiras), ocorreu em 2000, pela empresa canadense Seahawk Minerals Ltda., que, ao pesquisar uma área entre o Garimpo da Capoeirana e a Mina Belmont, encontrou fragmentos em alguns furos de sonda e, atualmente, está iniciando a produção de esmeralda (César-Mendes 2000).

Quanto aos aspectos geológicos, exceto os Garimpos de Campos Verdes e Monte Santo, onde não são observados pegmatitos, todas as outras jazidas são caracterizadas pela presença de uma seqüência vulcano-sedimentar em contato com rochas gnáissicas de composição granítica. Essa seqüência é representada por xistos metapelíticos, xistos de metaultramáficas, anfíbolitos diversos, veios pegmatóides e veios de quartzo. A esmeralda ocorre predominantemente associada aos xistos provenientes de metaultramáficas, representados por biotita/flogopita xistos ou biotititos. Portanto, a grande maioria das jazidas apresenta as condições básicas requeridas para a formação da esmeralda no tipo clássico, em que há pegmatitos cortando rochas metaultramáficas (Souza *et al.* 1987).



Foto 1. Esmeraldas na rocha encaixante, lapidadas e em jóia, provenientes do Garimpo de Capoeirana (Nova Era - MG), Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

Figura 1. Localização das principais jazidas e/ou ocorrências de esmeralda no Brasil (César-Mendes 2000).





Para se comparar com as demais jazidas de esmeraldas de Minas Gerais, as quais serão detalhadas nos itens subseqüentes, apresenta-se a seguir uma pequena sinopse da geologia das principais jazidas e/ou ocorrências brasileiras.

A Jazida de Campos Verdes, Estado de Goiás, está associada a veios carbonatados, a talco-clorita xistos carbonatados e a bolsões de biotita xistos. A fonte do berílio continua desconhecida e a esmeralda encontra-se na forma de porfiroblastos nos talco xistos. Quanto à geologia regional, a mineralização situa-se num cinturão de rochas metamórficas proterozóicas, cujo embasamento é representado por rochas gnáissicas, sendo que as supracrustais são metassedimentos da Seqüência de Santa Terezinha (César-Mendes 1989).

A mineralização de esmeralda em Monte Santo, Tocantins, a primeira descoberta na região amazônica, está encaixada em rochas metaultramáficas da Formação Xambioá, próximo ao contato com os nefelina sienitos da Suíte Monte Santo. Os trabalhos exploratórios estão em desenvolvimento e já se produzem esmeraldas de boa qualidade gemológica (César-Mendes & Ferreira Jr. 1998).

Na Jazida de Carnaíba, Bahia, tem-se uma seqüência de rochas representada pelo Granito de Carnaíba, pegmatitos, quartzitos e rochas metassomáticas e ultrabásicas. O referido granito seria a fonte das apófises pegmatíticas contendo berílio, as quais atravessaram as rochas ultrabásicas metamorfizadas do tipo serpentina xisto, ricas em cromo. A mineralização de esmeralda encontra-se associada a rochas produzidas pela ação metassomática dos filões pegmatíticos sobre os serpentina xistos, gerando talco-biotita xistos (Couto & Almeida 1982). A Mina de Socotó, também na Bahia, possui as mesmas características genéticas da Jazida de Carnaíba (Couto 1985).

No Estado de Minas Gerais, as mineralizações de esmeralda são encontradas em uma região com várias jazidas, constituindo-se, assim, a Província Esmeraldífera de Minas Gerais. Dentro dessa província, que se estende desde o Norte de Rio Casca, passando por Itabira e Nova Era, até o Sul de Guanhães (Figura 2), encontram-se as jazidas e/ou ocorrências de São Domingos do Prata (Garimpo do Toco), Nova Era (Garimpo da Capoeirana e Mina da Piteiras), Itabira (Mina Belmont), Brejaúba (Santa Maria de Itabira), Esmeraldas de Ferros e Cubas, todas situadas na borda Sudeste do Cráton São Francisco.

G a r i m p o d e E s m e r a l d a d a **Capoeirana, Minas Belmont e Piteiras**

As jazidas de esmeralda da região de Itabira/Nova Era estão localizadas na porção Centro-sudeste do Estado de Minas Gerais. O acesso principal, a partir de Belo Horizonte, é feito por meio de rodovia pavimentada (rodovias BR-262 e MG-434) até a cidade de Itabira, num percurso de aproximadamente 100 km. Segue-se de lá por mais 18 km na estrada não pavimentada (que liga Itabira a Nova Era - rodovia MG-120) (Figura 2) e atinge-se a Mina Belmont. A Mina da Piteiras dista 4,5 km da Mina Belmont, pela mesma rodovia em direção a Nova Era. Prosseguindo nessa direção, alcança-se o Garimpo da Capoeirana, após 5 km. Todas as jazidas estão próximas à estrada de ferro pertencente à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), a qual é utilizada para o escoamento do minério de ferro proveniente da região de Itabira.

A Mina Belmont, descoberta acidentalmente em 1978 por um ferroviário, é minerada pela empresa Belmont Gemas Ltda., detentora do decreto de lavra concedido em julho de 1981. A lavra é executada a céu aberto e subterrânea, seguindo-se um planejamento racional para o aproveitamento da esmeralda.

O Garimpo da Capoeirana também foi descoberto casualmente por um prospector leigo, em julho de 1988. Até então, a única jazida descoberta utilizando-se de métodos geológicos sistemáticos era a Mina da Piteiras, onde, além do mapeamento geológico, o levantamento geoquímico a partir de amostragens por sondagens a trado mecanizado indicou locais propícios para a mineralização de esmeralda. Esses pontos foram sondados, culminando na descoberta da esmeralda em testemunhos de sondagens rotativas.

Como essas três mineralizações de esmeralda situam-se muito próximas e dentro de um mesmo contexto geológico, a geologia será descrita de forma conjunta.

Figura 2. Mapa de localização da Província Esmeraldífera do Estado de Minas Gerais.

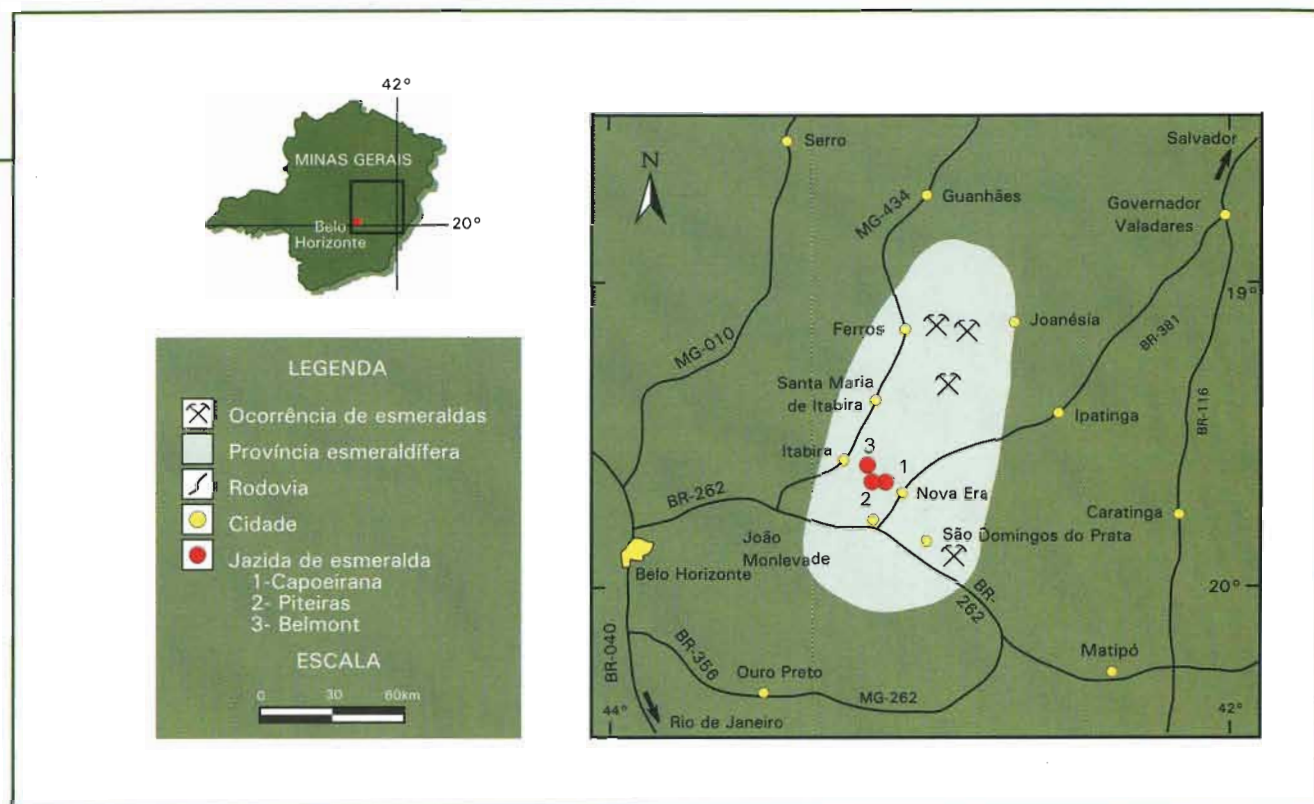


Foto 2. Esmeraldas lapidadas, provenientes do Garimpo de Capoeirana (Nova Era - MG). A gema maior pesa 4,14 quilates. (Foto: Antonio Liccardo).

Contexto Geológico

O Garimpo de Capoeirana e as Minas Belmont e da Piteira encontram-se em uma área ainda carente de trabalhos geológicos sistemáticos em escala de detalhe ou semidetalhe, haja vista que o mapeamento geológico regional da região do Quadrilátero Ferrífero, na parte central de Minas Gerais, na escala de 1:25.000, não incorpora essa região. Referências dessas jazidas, no contexto geológico local e regional, podem ser encontradas em Souza (1988), Souza *et al.* (1992); Machado (1998).

Para Schorcher *et al.* (1982), a geologia básica dos terrenos encontrados na região de Itabira/Nova Era é caracterizada por um embasamento cratônico arqueano composto basicamente por terrenos gnáissicos migmatíticos, com características poligenéticas e polimetamórficas, incluindo rochas graníticas do tipo Granito Borrachudos; por um cinturão de rochas verdes arqueanas, *greenstone belts*, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas; por metasedimentos do paleoproterozóico do Supergrupo Minas; e pelos metasedimentos do mesoproterozóico, constituído essencialmente por quartzitos do Supergrupo Espinhaço.

Em termos estratigráficos, o Garimpo de Capoeirana e as Minas Belmont e da Piteira estão localizados em área onde afloram rochas da Seqüência de Paragnais Basais do Supergrupo Minas na região de Nova Era. Essa seqüência é composta por metarcóseos a metagrauvacas com intercalações concordantes de mica xistos e quartzitos micáceos. Secundariamente, há rochas anfibolíticas, intercalações de xistos metaultramáficas e aparecimento descontínuo de veios pegmatíticos. Nesse contexto, as metaultramáficas e os veios pegmatíticos são as rochas mais importantes para a mineralização de esmeralda (Figura 3).

Em relação à gênese da esmeralda, todas as jazidas e/ou ocorrências de Minas Gerais estão associadas aos xistos derivados de rochas metaultramáficas, em locais de intensa percolação de fluidos hidrotermais relacionados aos pegmatitos, devido a condições tectônicas propícias. Esses xistos, representados essencialmente por biotita/flogopita xisto, clorita xisto e tremolita/actinolita xisto, constituem intercalações decimétricas a métricas associadas a micaxistos pelíticos e anfibolitos, geralmente alterados em superfície.

As áreas mineralizadas ocorrem, sempre, nas proximidades do contato entre os xistos metaultramáficos e as rochas granito-gnáissicas, do tipo Granito Borrachudos, estéreis em esmeralda.

A formação das esmeraldas mineiras está intimamente associada à interação química ocorrida entre a fase pegmatítica berilífera (representada pelos veios pegmatíticos) e as rochas metaultramáficas portadoras dos elementos cromóforos (Cr, V e Fe). A percolação de fluidos oriundos dos pegmatitos, nessas rochas, promove, devido ao efeito hidrotermal e/ou metassomático de contato, a interação de elementos como berílio, entre outros, com o cromo e subsequente cristalização da esmeralda nas auréolas de alteração das rochas metaultramáficas, representadas principalmente pelos biotita/flogopita xistos, clorita xistos e tremolita/actinolita xistos.

A cor verde-grama, característica das esmeraldas mineiras, similar ao que se verifica em outros locais do Brasil e do mundo, é geralmente uma consequência da incorporação, na rede cristalina, de pequenas quantidades de cromo, ferro e vanádio existentes na encaixante metaultramáfica. Normalmente, existe uma correlação intrínseca entre a intensidade do matiz de verde e a concentração desses cromóforos (Souza 1987).

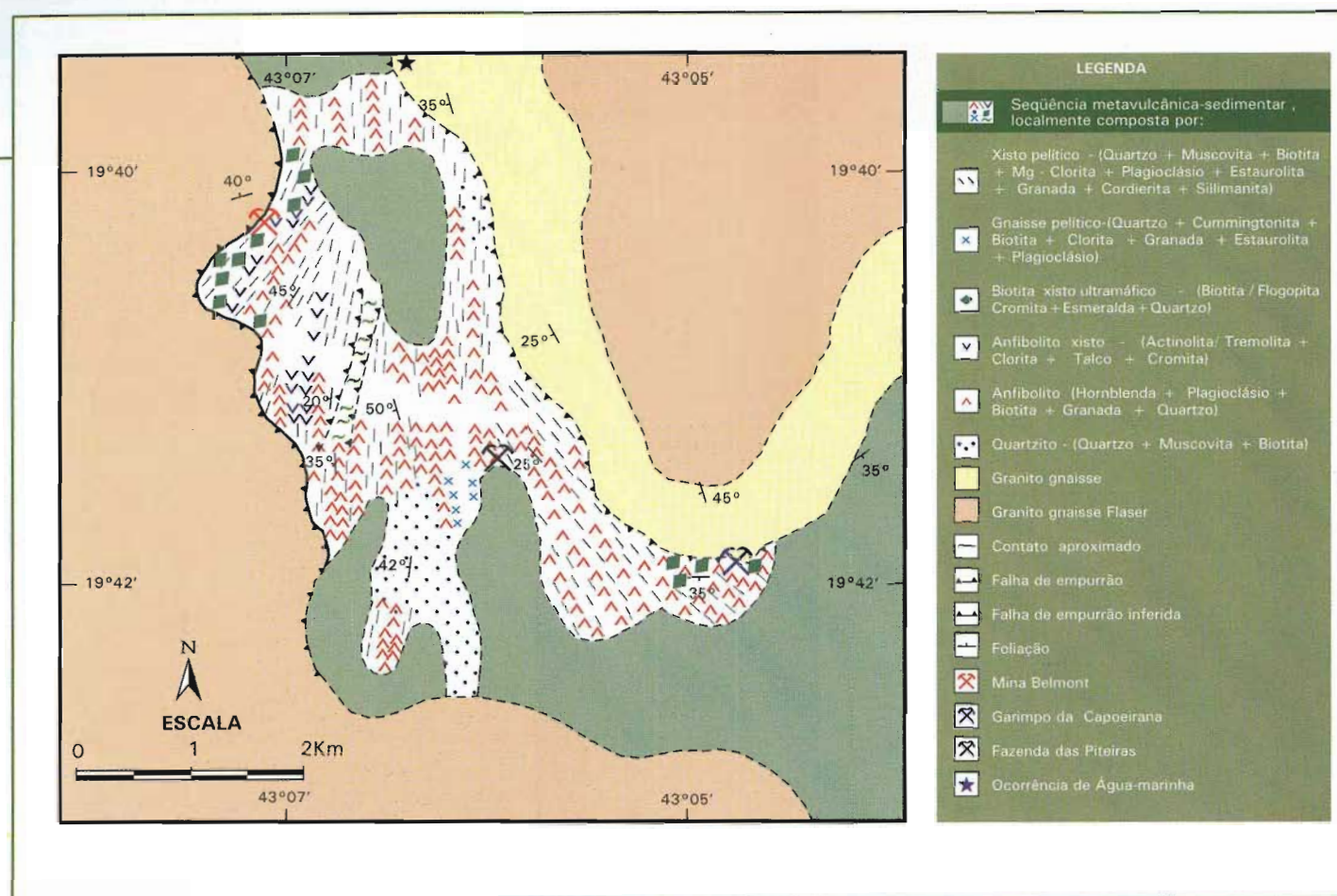
As esmeraldas das Minas Belmont e Piteiras e do Garimpo da Capoeirana

A exploração da esmeralda no Garimpo de Capoeirana é feita por meio de poços, túneis e galerias, com uma técnica de mineração rudimentar e sem preocupação com o aproveitamento total das esmeraldas gemológicas.

Na Mina de Itabira, inicialmente, a retirada era feita por meio de garimpagem até a concessão do decreto de lavra para a empresa Belmont Gemas Ltda. Atualmente, é realizada a céu aberto e subterrânea, contando com sistema mecanizado desde a extração até o beneficiamento final. Na lavra a céu aberto, o xisto altamente decomposto favorece, sobremaneira, a retirada mecânica do material esmeraldífero. Todo o material explotado é transportado por intermédio de carregadeira pneumática para a usina de beneficiamento, onde se tem o processo de lavagem para a separação dos finos (deslamagem), depois uma separação granulométrica e, finalmente, a catação manual do mineral-gema.



Figura 3. Mapa geológico do Garimpo da Capoeirana e das Minas de Esmeralda Belmont e da Fazenda das Piteiras (modificado de Souza *et al.* 1992).



Como na área da Fazenda das Piteiras não se observa em superfície a presença de biotita/flogopita xisto, necessitou-se de pesquisa sistemática para a descoberta das esmeraldas. Atualmente, a Mina da Piteiras está iniciando um processo de lavra e separação da esmeralda muito similar ao método subterrâneo da Mina Belmont.

Nas três jazidas, a grande totalidade das esmeraldas é encontrada sob a forma de pequenos fragmentos sem forma definida, geralmente com dimensões entre 1 e 3 cm. Os cristais idiomórficos são constituídos por prismas relativamente longos (até cerca de 8 centímetros) e grossos, exibindo, às vezes, faces prismáticas bem desenvolvidas. A clivagem basal é pobre e confere às terminações dos cristais um aspecto ligeiramente serrilhado. As cores predominantes são verde ligeiramente azulado e o verde-grama, sendo menos freqüente o verde ligeiramente amarelado, típico das graduações de melhor qualidade. Os índices de refração e birrefringência (Δ), obtidos em refratômetros gemológicos, utilizando-se material de cor verde ligeiramente pálida, forneceram valores variáveis para n_z de 1,579 a 1,584, n_w de 1,584 a 1,588 e Δ de 0,004 a 0,006. A transparência é classificada como semitransparente, podendo ser levemente afetada pela presença de inclusões tubulares paralelas e extremamente finas, dispostas na direção do eixo *c* do cristal,

imprimindo um aspecto algo aveludado ou leitoso à gema. Esse aspecto aveludado aparece preferencialmente quando a mesa da pedra lapidada é disposta paralelamente ao eixo c do cristal, ao passo que, quando colocada perpendicularmente ao referido eixo, a transparência é aumentada e a cor verde ligeiramente amarelada tende a predominar sobre o verde azulado.



135



Foto 3. Vista da Mina de esmeralda Belmont (Itabira - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

Foto 4. Garimpeiros trabalhando o xisto esmeraldífero retirado das galerias do Garimpo da Capoeirana (Nova Era - MG). (Foto: Antonio Liccardo).



Um fato importante que se verifica na produção global das esmeraldas dessas jazidas é a porcentagem relativamente alta de material com boa qualidade quando comparado com outros depósitos brasileiros e com a maioria das jazidas estrangeiras (Souza 1988, Souza *et al.* 1992; Machado 1998).

Essas esmeraldas caracterizam-se por apresentar um número relativamente pequeno de inclusões cristalinas. É comum a presença de mica (biotita/flogopita), quartzo, tremolita, dolomita, andesina, apatita e ralstonita entre as inclusões cristalinas. Entretanto, a inclusão mineral mais freqüente e notável é representada pela mica (biotita/flogopita), a qual se manifesta segundo duas gerações distintas e com várias tonalidades acastanhadas. A primeira geração, observada sob a forma de placas ou escamas de coloração acastanhada não orientadas, exibe contornos geralmente arredondados ou, às vezes, irregulares e, em alguns casos, apresenta feições que sugerem processos de dissolução, tratando-se, portanto, de uma inclusão protogenética. A segunda geração, por sua vez, caracteriza-se pela presença de cristais euédricos de contornos ligeiramente rômnicos ou hexagonais, orientados paralelamente ao plano basal {0001} da esmeralda. Essa disposição orientada sugere uma classificação temporal singenética para esse tipo de inclusão (Souza 1988, Souza *et al.* 1992).

Um outro grupo de inclusões, também muito importante nessas esmeraldas, é representado pelas inclusões fluidas. Destacam-se, sobretudo, os tubos de crescimento constituídos por canais capilares preenchidos por duas ou mais fases, orientados na direção cristalográfica *c*. Por vezes, aparecem, também, tubos de dimensões maiores em quantidades variáveis, que acompanham esses canalículos. O grupo mais interessante de inclusões fluidas nas esmeraldas mineiras é, sem dúvida, formado pelas inclusões bifásicas e polifásicas que apresentam uma grande riqueza de formas e uma variação considerável de conteúdos.

As inclusões fluidas são também encontradas em cavidades bem delimitadas ou quase retangulares, bem como no interior de cristais negativos.

É válido salientar, ainda, a presença de fraturas de tensão de forma ligeiramente elipsoidais muito próprias dessas esmeraldas. Essas fraturas, geralmente apresentando em seu interior cavidades preenchidas por duas ou mais fases minerais, desenvolvem-se segundo arranjos paralelos entre si e ligeiramente paralelos à face basal da esmeralda.

Fraturas e fissuras não cicatrizadas ou preenchidas por material epigenético são também observadas (Souza 1988, Souza *et al.* 1992).



Foto 5. Brincos de esmeralda (Capoeirana - MG) em ouro. Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).



Foto 6. Cristal pismático e hexagonal de esmeralda, no biotita/flogopita xisto e veio de quartzo, proveniente do Garimpo da Capoeirana (Nova Era - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

Dentro do contexto geológico geral das jazidas de esmeralda existentes no Estado de Minas Gerais, descrever-se-á uma metodologia sistemática de prospecção, que possa ser executada em outros locais dessa Província Esmeraldífera. Uma vez que a maioria das jazidas foram descobertas casualmente e que as suas características geológicas são similares, enfatiza-se que, por meio de uma sistematização metodológica, a probabilidade de descoberta de novas jazidas para o Estado de Minas Gerais aumenta significativamente.

A potencialidade gemológica da região já é um fato comprovado. Após as descobertas casuais das Jazidas Belmont e Capoeirana, a empresa canadense Seahawk Mineração Ltda, utilizando-se de pesquisa sistemática, porém não publicada na literatura, encontrou uma nova jazida de esmeralda: a Mina da Piteira. Mais recentemente, em função dessa última descoberta e por interesse internacional, novas pesquisas vêm sendo desenvolvidas nas regiões periféricas a essas jazidas clássicas.

Dentro dessa perspectiva, os trabalhos realizados e aqui documentados como um estudo de caso, referem-se às atividades de pesquisa desenvolvidas com enfoque na descoberta e na caracterização de ocorrências potencialmente hospedeiras da mineralização de esmeralda.

Dessa forma, relatam-se as informações, dados e conclusões obtidos por meio de um trabalho sistemático de prospecção geológica com enfoque petrográfico, geoquímico, geofísico e econômico, visando encontrar uma nova jazida de esmeralda nessa região, objetivo alcançado após todas as etapas aqui descritas.

M a p e a m e n t o G e o l ó g i c o B á s i c o

Iniciou-se a prospecção utilizando-se o mapeamento geológico básico, na escala 1:10.000 (Figura 4), com uma amostragem sistemática para uma melhor caracterização petrográfica dos litotipos presentes.

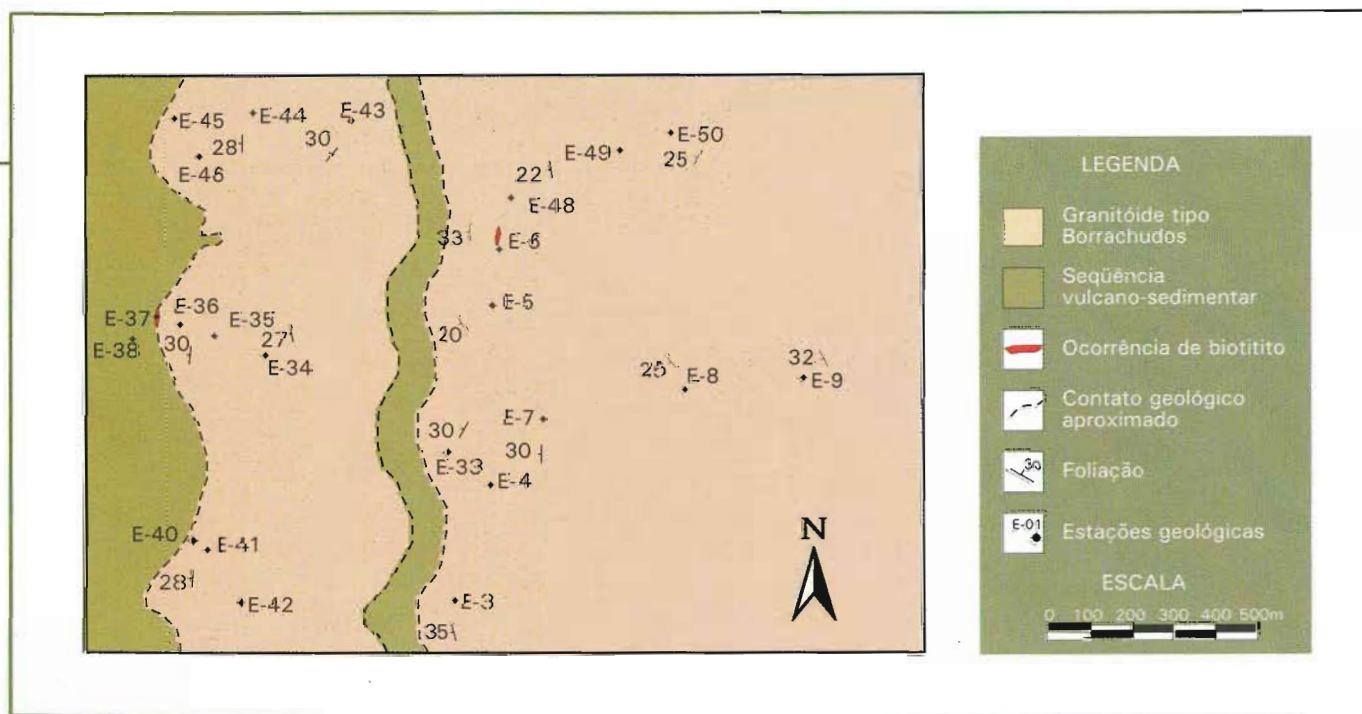
Os corpos graníticos encontrados na região, denominados de Granito Borrachudos, são de idade proterozóica e bastante gnaissificados. Os níveis metaultramáficos da seqüência vulcano-sedimentar, também do proterozóico, sofreram intenso metassomatismo/hidrotermalismo, resultando nos biotita/flogopita xistos.

A definição de contatos entre a seqüência vulcano-sedimentar e o Granito Borrachudos é de fundamental importância na delimitação de áreas potencialmente mineralizadas em esmeralda, além de fornecer subsídios para a definição das etapas de pesquisas subseqüentes.

138

Baseando-se nesse contexto, na Figura 4, são apresentadas as unidades litológicas mapeadas, importantes para a mineralização de esmeralda. A delimitação da seqüência vulcano-sedimentar, estreita e alongada, situada no centro da área, foi inferida com base apenas em um afloramento e na coloração do solo.

Figura 4. Mapa geológico da área prospectada para esmeralda em Itabira / Nova Era, Estado de Minas Gerais.



Descrição Petrográfica

Granito Borrachudos e Pegmatitos Associados

Na área pesquisada, o Granito Borrachudos ocorre variavelmente deformado, em alguns locais, mostrando-se gnaissificado, por conseguinte, sem as características texturais macroscópicas típicas de uma rocha ígnea plutônica. Essa litologia apresenta-se como a mais extensa em ocorrência na área (Figura 4).

Macroscopicamente, é constituído por 45 a 55% de feldspatos (variedade potássica e plagioclásio), 40 a 45% de quartzo e 10 a 15% de biotita. Esse último mineral evidencia a foliação da rocha através de seu arranjo planar a suavemente ondulado, sempre contornando os grãos de quartzo e feldspatos, também deformados e alongados segundo o plano da foliação. Essa estruturação é homogênea em toda a área, tornando-se localmente melhor desenvolvida na porção oeste, entre possíveis ocorrências da seqüência vulcano-sedimentar. Nessa porção, apresenta-se como um granito gnaissificado fracamente bandado, no qual uma sutil diferenciação, de bandas algo mais félsicas e outras mais máficas, pode ser observada. Também verifica-se o aparecimento sistemático de moscovita, que perfaz até 5% do volume da rocha e indica a ocorrência da transformação de plagioclásio em mica branca, induzida por uma maior deformação.

A ocorrência de veios pegmatóides no interior do granito é homogênea. Esses níveis normalmente não excedem 30cm, sendo comum a observação de corpos com espessura variando de 2 a 10cm. Esses corpos se apresentam sempre como camadas razoavelmente contínuas e paralelas à foliação e, algumas vezes, constituem pequenos núcleos de maior espessura, denominados buchos, alcançando até 50cm. Composicionalmente, são constituídos por feldspatos, quartzo, biotita, anfibólios e magnetita. O quartzo e o feldspato ocorrem em cristais e grãos que alcançam até 10cm, enquanto os demais minerais possuem geralmente 1cm.

Observam-se raras ocorrências de corpos lenticulares em superfície, oriundos de rochas ricas em biotita e importantes em relação à ocorrência de berilo esverdeado e esmeralda. Duas lentes com espessura de 0,5 a 1,0 m e comprimento aparente de 3 a 5m foram descritas. Nesse local, tem-se uma completa alteração do protólito ultramáfico para biotitito ou flogopitito, associados aos pegmatitos. No entanto, considerando-se que uma jazida de esmeralda sempre deve conter grandes corpos metaultramáficos, associados à seqüência vulcano-sedimentar, tais lentes poderiam constituir apenas uma ocorrência de esmeralda.

Seqüência Vulcano-sedimentar

Enfatiza-se que essa seqüência de rochas, de origem sedimentar e vulcânica, já metamorfisada e localmente metassomatizada, é a hospedeira das rochas metaultramáficas ricas em Cr, V e Fe que, quando percoladas por soluções pegmatíticas, ricas em Be, Si e K, altera-se para rochas enriquecidas em biotita/flogopita, reunindo, assim, as condições químicas necessárias para a geração dos porfiroblastos de esmeralda.

Na área pesquisada, a ocorrência de afloramentos *in situ* dessa seqüência é rara. Em alguns locais, não foi observada a ocorrência de rochas, mas um solo rico em minerais como cianita e estaurolita, que indicam a ocorrência de rochas ricas em Al. Observou-se, também, a ocorrência de rochas ricas em biotita intercaladas a anfibolitos puros (sem feldspato), com uma espessura mínima de 1,5 m, que se mostra como forte candidata a representar um nível mineralizado.

Em um dos pontos descritos, apesar de estar no domínio do Granito Borrachudos, ocorre um bloco de aproximadamente 2 m de diâmetro de uma rocha, exclusivamente formada por anfibólios, que, muito provavelmente, é parte integrante da seqüência vulcano-sedimentar.

Um outro bloco de rocha, composta predominantemente por quartzo, feldspato, biotita e moscovita, diferencia-se do Granito Borrachudos por apresentar um volume muito maior de micas e quartzo concentrado em lentes ou *ribbons*. Dessa forma, interpretou-se esse litotipo como pertencente à seqüência vulcano-sedimentar.

Em função da escassez de afloramentos da seqüência vulcano-sedimentar e de seus respectivos contatos com as rochas graníticas na área pesquisada, foram desenvolvidos levantamentos geofísicos sistemáticos para delimitar a ocorrência desses litotipos em subsuperfície.

Levantamento Geofísico

As atividades desenvolvidas no levantamento geofísico englobaram os métodos geofísicos Sistema de Radar (GPR) e Eletroresistivo. Baseando-se no mapeamento geológico, definiram-se as seções geofísicas para o GPR, com direção Leste-oeste, de forma a conseguir caracterizar em subsuperfície a presença das litologias, os seus contatos e suas características estruturais/tectônicas. O levantamento Eletroresistivo, devido à topografia irregular e acentuada, foi realizado apenas nas suas porções menos íngremes.

Sistema de Radar (GPR)

O GPR, um método eletromagnético, emite ondas de rádio de 10 a 1.000MHz no solo para detectar as reflexões do sinal e, a partir desses dados, inferir a estruturação do subsolo. O campo eletromagnético (EM), variável no tempo, consiste do acoplamento dos campos elétricos (E) e magnético (H).

Na maioria das situações geológicas, as propriedades elétricas são os fatores dominantes que controlam a resposta do solo ao campo EM, já que as variações magnéticas são, em sua maioria, muito fracas, podendo ser desprezíveis.

O equipamento de radar consiste de 4 (quatro) elementos principais: a unidade de transmissão, a de recepção, a de controle e a de visualização. O transmissor produz um pulso de alta voltagem com mínima duração; o pulso é aplicado na antena transmissora que o irradia para o solo/rocha. A antena é confeccionada de tal forma a propiciar a irradiação desse sinal com a maior fidelidade, de modo que o pulso que está penetrando no terreno seja razoavelmente semelhante àquele gerado eletronicamente. O sinal transmitido se propaga no solo/rocha e os sinais refletidos retornam à superfície e são detectados pela antena receptora e repassados para o sistema de recepção de sinais. Esse sistema amplifica os sinais e os ajusta para serem visualizados na tela. Podem ser utilizadas antenas com diferentes frequências centrais para a execução dos levantamentos. Quanto maior a frequência, menor será a profundidade a ser investigada. Quanto menor o comprimento da antena, melhor será a resolução do refletor mapeado, e vice-versa.

A técnica GPR é similar, em princípio, à sísmica de reflexão. O radar produz pulsos eletromagnéticos que são transmitidos para o terreno, por intermédio de antena emissora. Como a propagação do sinal depende das propriedades dielétricas do solo/rocha atravessada pelo sinal e como as propriedades dielétricas das rochas são principalmente controladas pelo seu conteúdo de água, o radar, então, é sensível às variações de composição (pH, viscosidade, temperatura, etc.) dos fluidos intersticiais das rochas e às mudanças estruturais, preenchidas ou não com água. As mudanças nas propriedades dielétricas da rocha causam a reflexão do sinal, que é captado pela antena receptora, a partir da qual é amplificado, digitalizado e gravado. O GPR vem sendo aplicado em diversas áreas com muito sucesso (Benson 1995; Davis & Annan 1989; Hara & Sakayama 1985; Huggenberger *et al* 1994).

A velocidade e a atenuação da onda eletromagnética são fatores que descrevem sua propagação no terreno. Esses fatores dependem das propriedades dielétricas e da condutividade dos materiais presentes na subsuperfície e são de grande importância no processamento dos dados para posterior interpretação.

O modo mais usual de aquisição de dados com o GPR é o levantamento com antenas em distância constante, *common offset*, nos quais o sistema com uma geometria fixa de antenas é transportado ao longo de uma direção, obtendo-se um perfil das reflexões/posição. Também pode ser usado de outras maneiras, tais como o CMP, *common midpoint* - ponto médio comum, o WARR, *wide angle reflection refraction* - reflexão e refração de alto ângulo. Ambas as técnicas são utilizadas para se obter o perfil de velocidade de uma área; transiluminação, *transillumination* - tomografia, e múltiplos canais, *CDP gather*.

Baseando-se nesses princípios, realizaram-se alguns perfis de direção W-E na área piloto, sistematicamente locados com o intuito de determinar, em subsuperfície, o contato e as estruturas tectônicas entre o Granito Borrachudos e a sequência vulcano-sedimentar.

A técnica, nesse levantamento, consistiu do *common offset*, utilizando-se dos parâmetros de frequência central da antena de 50MHz; janela de tempo igual a 900ns; intervalo de amostragem temporal aproximadamente 10 vezes à frequência central da antena; espaçamento entre as estações de 0,5m; espaçamento entre as antenas de 2,0m. A posição das estações e o espaçamento entre as

linhas foram previamente definidos baseando-se nos dados geológicos. A orientação da antena sempre é colocada perpendicular à direção da linha.

Nos perfis obtidos (radargramas), identificaram-se alguns refletores que podem indicar variação litológica brusca e, em alguns casos, fraturas horizontalizadas. Quando a direção do sinal for perpendicular, ou aproximadamente perpendicular, à direção da fratura, elas aparecem no radargrama com amplitude bem forte e boa continuidade lateral. Assim, quanto mais oblíquo, menos delineada será a fratura.

O GPR tem sido usado em diferentes aplicações e em locais de contextos geológicos diversos. Como sua técnica de aquisição é muito semelhante à sísmica de reflexão, muito desse processamento é utilizado também no tratamento de dados de radar (Fisher *et al.* 1992).

O processamento é feito em quatro estágios, iniciando-se com a edição de dados, na qual se realiza o processamento básico; *declipping* e *dewow*, com a finalidade de retirar os ruídos de baixa frequência e os traços duplicados ou com problemas na aquisição; seguidos pela filtragem, geralmente, utilizando-se o filtro gaussiano de uma frequência central e pelo processamento avançado, que consiste na conversão tempo x profundidade, a partir da interpretação da velocidade no perfil CMP; e, finalmente, a interpretação de todas as feições geológicas de interesse.

No caso específico dessa pesquisa-piloto, o filtro gaussiano utilizado apresenta uma frequência central de 50MHz e a velocidade média, encontrada na interpretação do perfil CMP, foi de 100 m/μs (Figura 5). A interpretação foi baseada no registro gráfico das feições geométricas observadas (Figura 6).

Após definido o padrão geométrico para um tipo litológico, utilizou-se esse padrão na definição das demais seções.

Na região pesquisada, as variações geométricas observadas em profundidade no granito, diferenciam-se em três níveis. Um

Figura 5. Exemplos de perfil CMP de uma seção na região de Itabira/ Nova Era, onde observa-se a velocidade média interpretada igual a 100m/ms.

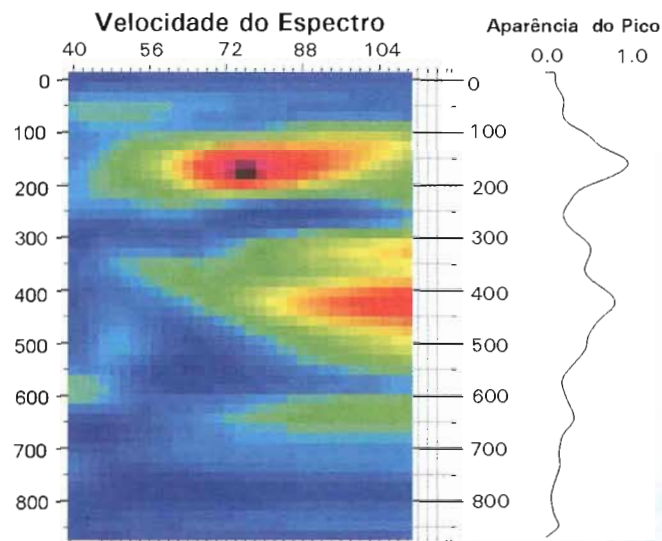
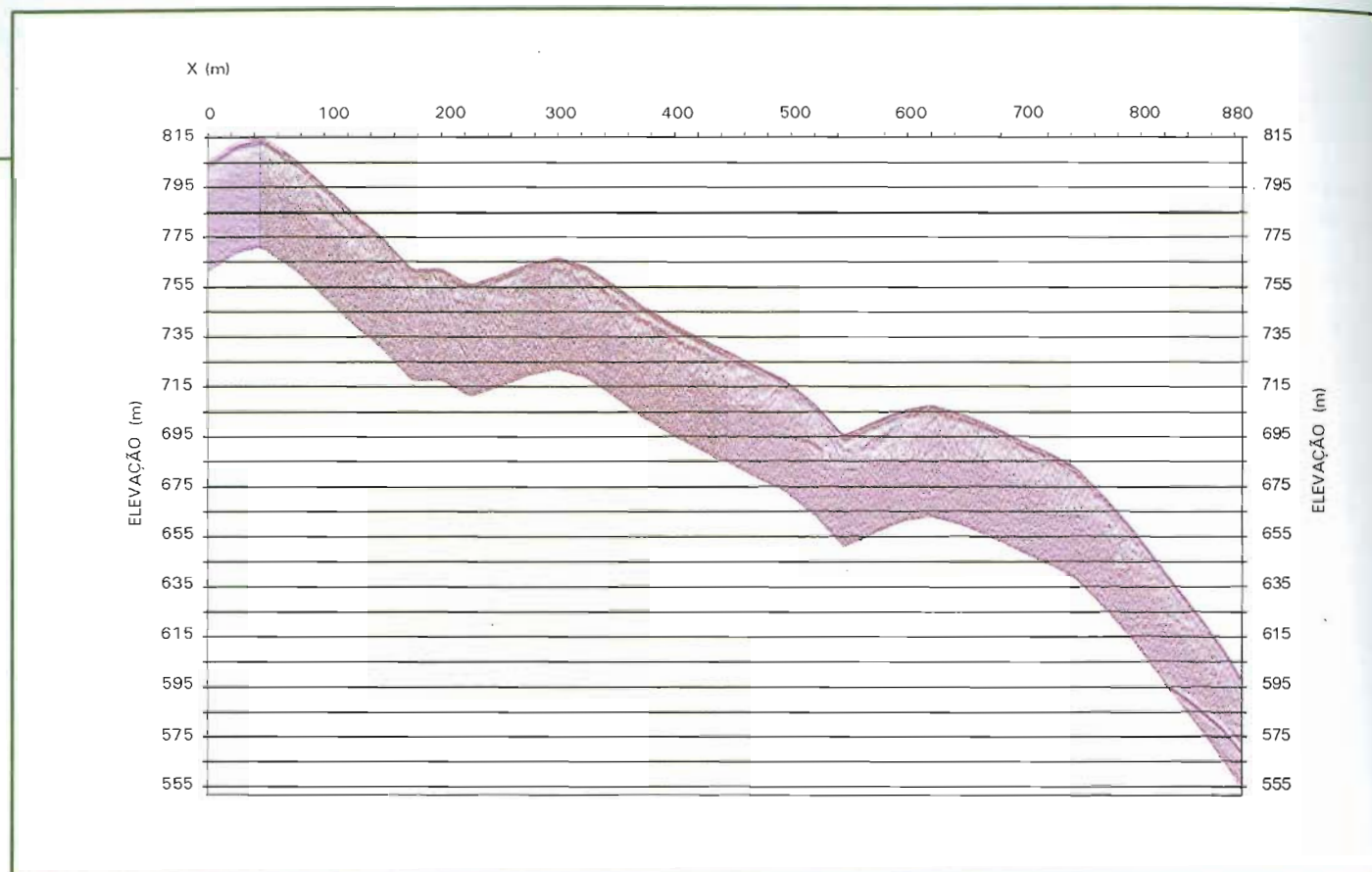


Figura 6. Exemplos de radargramas obtidos por georadar (GPR) na região de Itabira/ Nova Era.



superior, no qual se observa uma foliação bem nítida; um nível intermediário, mais compacto, homogêneo e com refletores plano paralelos de baixo caimento, indicando provável fraturamento interno; e um inferior em que os refletores apresentam características descontínuas. Essa diferenciação nos refletores relaciona-se à variação de alteração do corpo granítico, pois a forma homogênea e isotrópica dos refletores, comum em locais onde predominam apenas granito, é mantida, não estando, portanto, relacionada à variação composicional da rocha em subsuperfície.

Nos locais em que se identificou a seqüência vulcano-sedimentar, os refletores apresentam um padrão sigmoidal, com características heterogêneas, diferentemente do padrão homogêneo apresentado pelas rochas graníticas. A variação em profundidade da geometria desses refletores é pequena. Conseqüentemente, pode-se concluir que a seqüência está presente e é provavelmente contínua até a profundidade máxima investigada por meio desse método, ou seja, 40 metros.

Observando-se as seções, quando havia uma gradação das características heterogêneas para as homogêneas e vice-versa, sempre verificava-se a presença de falhas de pequeno rejeito. Portanto, conclui-se que o contato entre a seqüência e o granito é tectônico e, provavelmente, através dessas falhas, houve a percolação de soluções berilíferas responsáveis pela mineralização de esmeralda.

Eletroresistividade

Consiste no emprego de uma corrente elétrica artificial transmitida ao terreno por intermédio de eletrodos. A partir disso, mede-se o potencial em outros eletrodos colocados na vizinhança do fluxo da corrente, possibilitando identificar regiões, em subsuperfície, que apresentem maior ou menor resistividade ou condutividade.

O método eletroresistividade, comumente, emprega pelo menos quatro eletrodos cravados no solo, dois para injetar corrente e dois para medir a diferença de potencial, formando arranjos lineares ou dipolares. A investigação do substrato pode se dar na forma de caminhamento e mapeamento lateral ou vertical. Quando o mapeamento é vertical, denomina-se de sondagem elétrica.

No caminhamento, a dimensão do arranjo permanece fixa e ele é deslocado sobre a área investigada, obtendo-se a variação da resistividade elétrica a uma mesma profundidade. Ao expandir o arranjo, a corrente penetra mais profundamente no solo, permitindo a investigação das camadas mais inferiores.

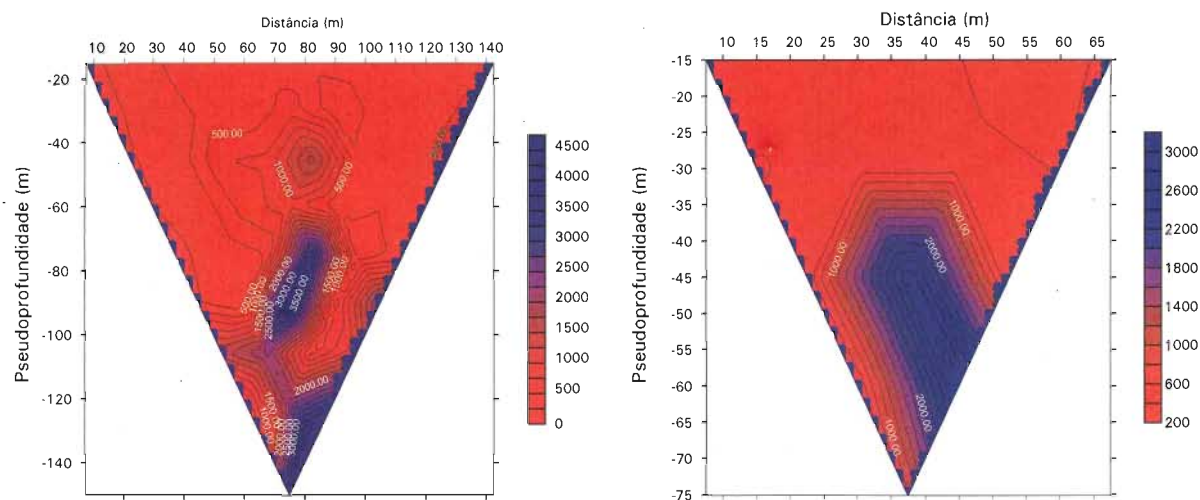
Na área piloto, utilizou-se a técnica de caminhamento, com o arranjo linear, em que os eletrodos de corrente extremos da linha são fixos. Essa metodologia permite o levantamento rápido em áreas com pouca ou quase nenhuma vegetação, permitindo uma diminuição acentuada no tempo de aquisição dos dados.

Inicialmente, foi feita a marcação das posições das estações para colocação dos eletrodos, tanto os de corrente quanto os de potencial. A profundidade observada para as estações é considerada o ponto médio entre os eletrodos de potencial e igual à metade da distância entre eles. Prosseguiu-se o trabalho com as leituras em um resistivímetro.

Por se ter uma topografia muito íngreme e irregular na maior parte da área pesquisada, realizaram-se apenas algumas seções, nos locais de menor declive, diminuindo assim o efeito topografia.

Analisando as pseudo-seções obtidas (Figura 7), constata-se uma região fortemente resistiva com aproximadamente 50m de profundidade. Esses corpos podem ser interpretados como rochas mais coesas, homogêneas, sem fraturamentos e com baixa condutividade eletrolítica.

Figura 7. Exemplos de pseudo-seções obtidas no levantamento eletroresistivo na pesquisa de esmeralda na região de Itabira / Nova Era.



Sondagem a Trado Mecanizado e Amostragem com Boca de Lobo

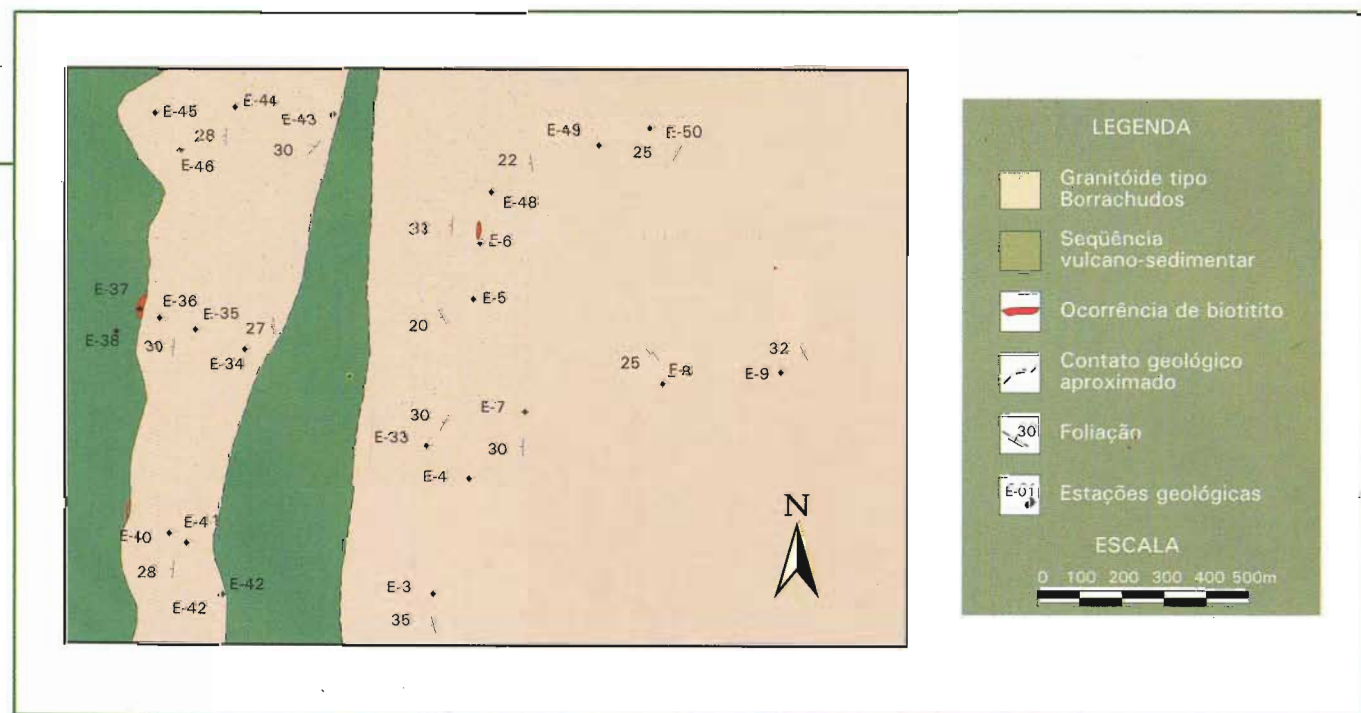
A sondagem a trado mecanizado é um método de pesquisa bastante rápido, de fácil deslocamento do equipamento, que permite fazer amostragem para geoquímica e melhor reconhecimento em subsuperfície rasa. Sabendo-se que a mineralização de esmeralda está associada a tipos rochosos bem definidos, a utilização desse método permite o melhor conhecimento do comportamento e das características pontuais dessas litologias em subsuperfície, até profundidades médias de 20m.

Utilizando-se de boca de lobo, obtém-se uma amostragem rápida e fácil, a uma profundidade constante de 30cm, permitindo-se elaborar mapas de isotores dos elementos quimicamente analisados no solo. Considerando-se que determinados elementos químicos associam-se a tipos litológicos distintos, podem-se mapear anomalias geralmente relacionadas a rochas metaultramáficas (Fe, Mg, Al, dentre outros) e graníticas (tais como Si, Al, K e Be).

Partindo-se do mapeamento geológico, elaborou-se uma malha leste-oeste, eqüidistante de 100 m, no total de quinze seções, onde a cada 25 m realizou-se uma amostragem através de sondagem a trado mecanizado ou boca de lobo. Nessas seções, foram obtidas 330 amostras para análises geoquímicas.

O trabalho de sondagem a trado mecanizado permitiu delimitar melhor o contato entre o Granito Borrachudos e os quartzitos, xistos metapelíticos, anfibolitos e biotititos/flogopititos da seqüência vulcano-sedimentar, anteriormente inferido pelo mapeamento geológico (Figura 4). No referido mapeamento de detalhe (Figura 8), pode-se observar que, na parte Central e Oeste da área, a seqüência vulcano-sedimentar está delimitada com exatidão. Essa faixa Norte-Sul, estreita e alongada, anteriormente inferida, apresentou-se mais espessa e com maior potencialidade por conter as rochas metaultramáficas portadoras de esmeralda.

Figura 8. Mapa geológico, após o detalhamento com a sondagem a trado mecanizado, da área prospectada para esmeralda em Itabira / Nova Era, Estado de Minas Gerais.



Abertura de Galerias

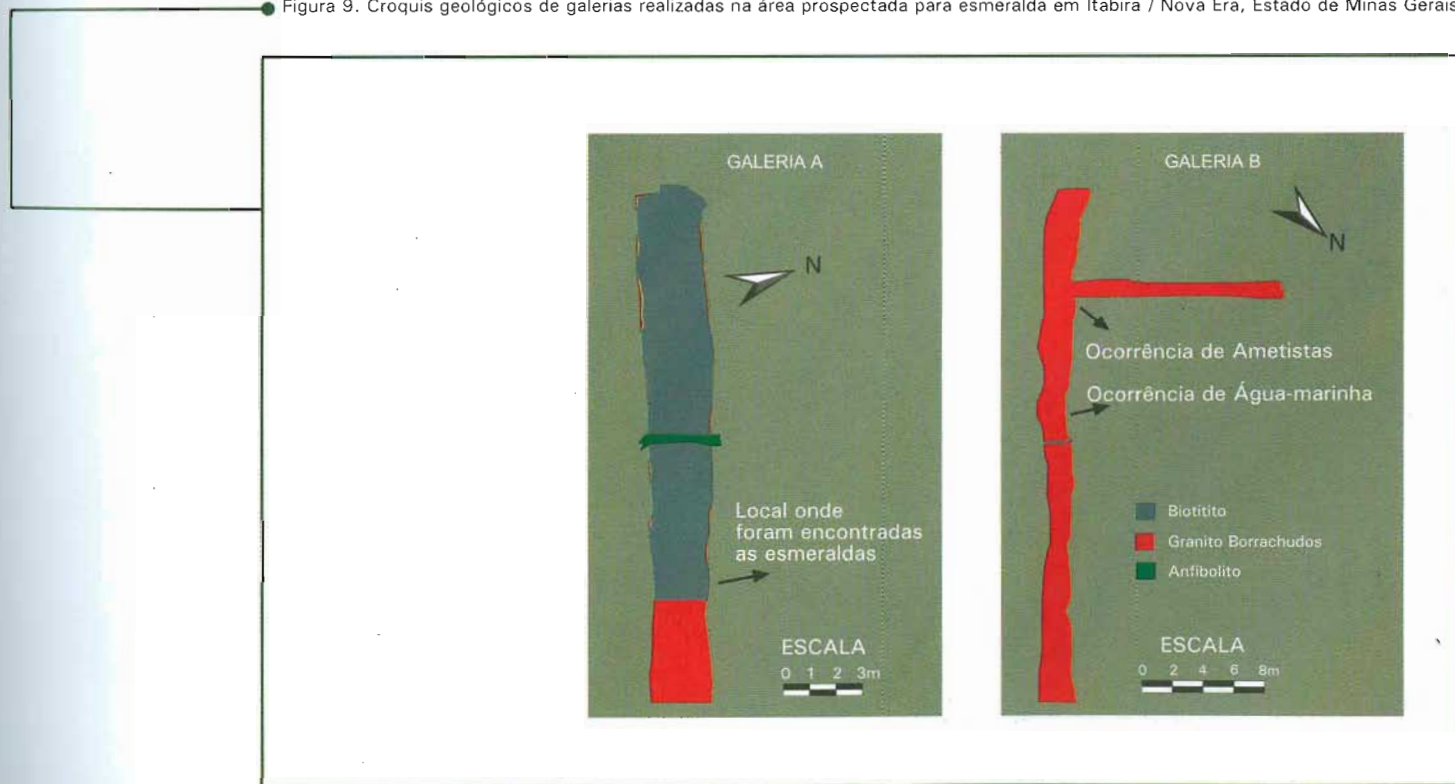
Na pesquisa de esmeralda, dentro do contexto geológico apresentado, o principal objetivo é separar, com exatidão, rochas granitóides da seqüência metaultramáfica. A galeria é um método de pesquisa que permite descrever as litologias atravessadas, verificar, quantas vezes se fizer necessário, algum dado geológico, fazer amostragem para análise química e para possível processamento do material.

Nessa área piloto, foram feitas sete galerias, num total de 147m, nos locais onde o mapeamento geológico, geofísico e sondagem a trado mecanizado indicaram tipos rochosos associados à esmeralda. Na Figura 9, podem-se observar croquis exemplificando duas galerias e o mapeamento litológico nelas realizado.

Na seqüência metaultramáfica, as galerias permitem observar e descrever os canais de percolação atravessados pelos fluidos pegmatíticos e o metassomatismo produzindo o biotita/flogopita xisto, além da presença ou não de berilo industrial e água-marinha nos pegmatitos encaixados no Granito Borrachudos.

As galerias A e B (Figura 9) feitas, respectivamente, em biotita/flogopita xisto e Granito Borrachudos certificam essa constatação, visto que, na primeira, foram encontradas esmeraldas durante a pesquisa e, na segunda, além de água-marinha límpida, que permitiu a sua lapidação, retiraram-se aproximadamente 2kg de ametista de qualidade gemológica inferior, oriunda da percolação de fluidos de pegmatitos ricos em quartzo e feldspato ou fluidos pegmatíticos ricos em Si, Al e álcalis.

Figura 9. Croquis geológicos de galerias realizadas na área prospectada para esmeralda em Itabira / Nova Era, Estado de Minas Gerais.



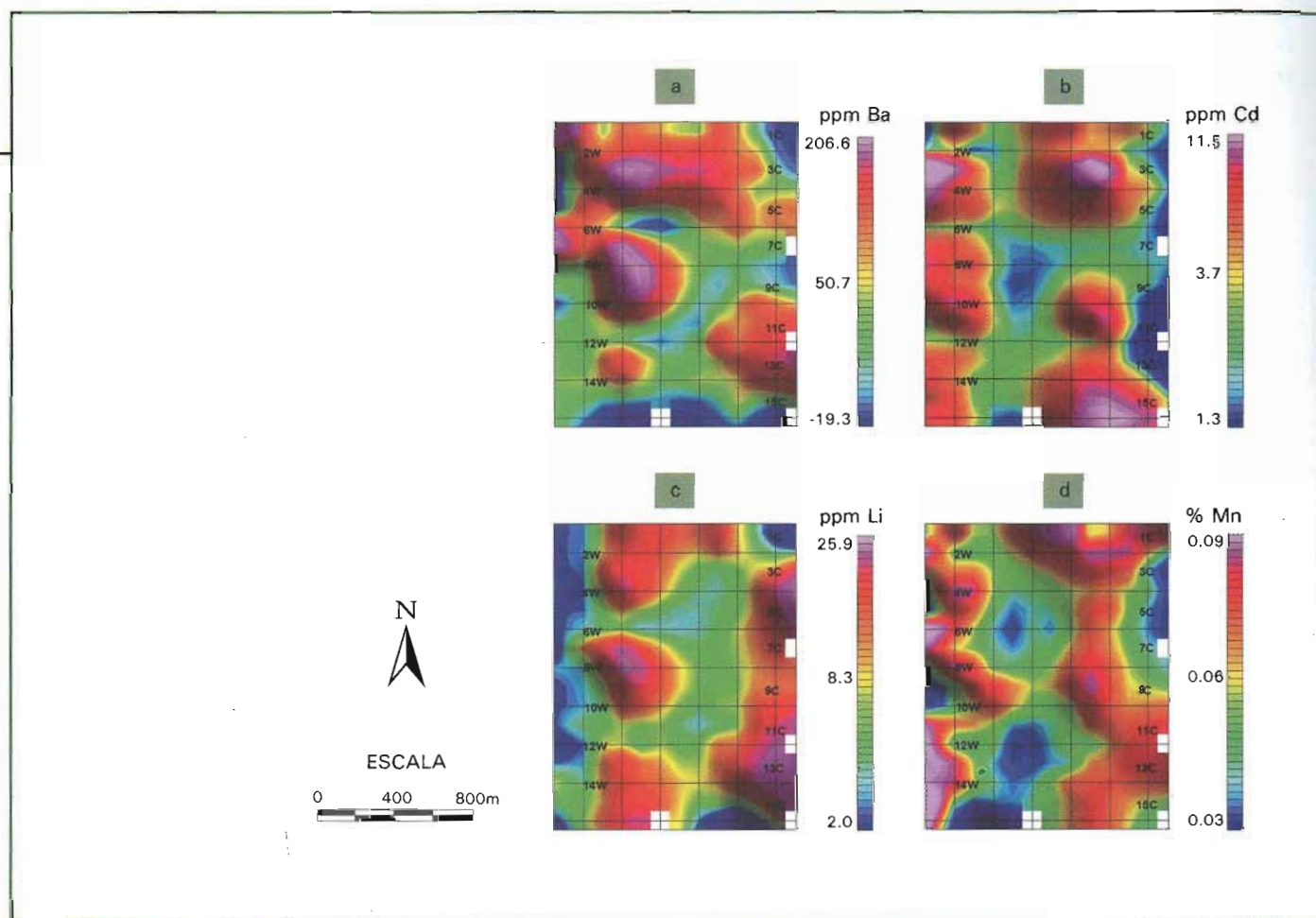
Geoquímica

De posse dos resultados obtidos, o próximo passo foi correlacionar os elementos químicos presentes no saprólito com a rocha que o originou, utilizando-se de metodologia geoquímica. Para essa etapa, amostrou-se sistematicamente apenas a metade ocidental da área piloto (Figura 8), onde ocorrem as duas faixas de direção Norte-Sul das rochas metaultramáficas.

Utilizando-se das amostras obtidas pelo método trado mecanizado e boca de lobo, realizaram-se as análises de geoquímica. As amostragens, todas a 30cm de profundidade, foram realizadas a cada 25m e enviadas para análise no Laboratório Lakefield Geosol Ltda. (Belo Horizonte - MG), no qual por meio do uso de ICP, dosaram-se 31 elementos químicos representativos de alteração de granitóides e litotipos associados à seqüência vulcano-sedimentar.

Os resultados das análises químicas obtidas foram tratados com o *software* GEOSOFT Inc., que permite uma visualização em cartas de isotores da distribuição dos elementos analisados.

Figura 10. Mapas geoquímicos obtidos na região de Itabira / Nova Era, Estado de Minas Gerais, apresentando os isovalores de Ba (a), Cd (b), Li (c) e Mn (d).

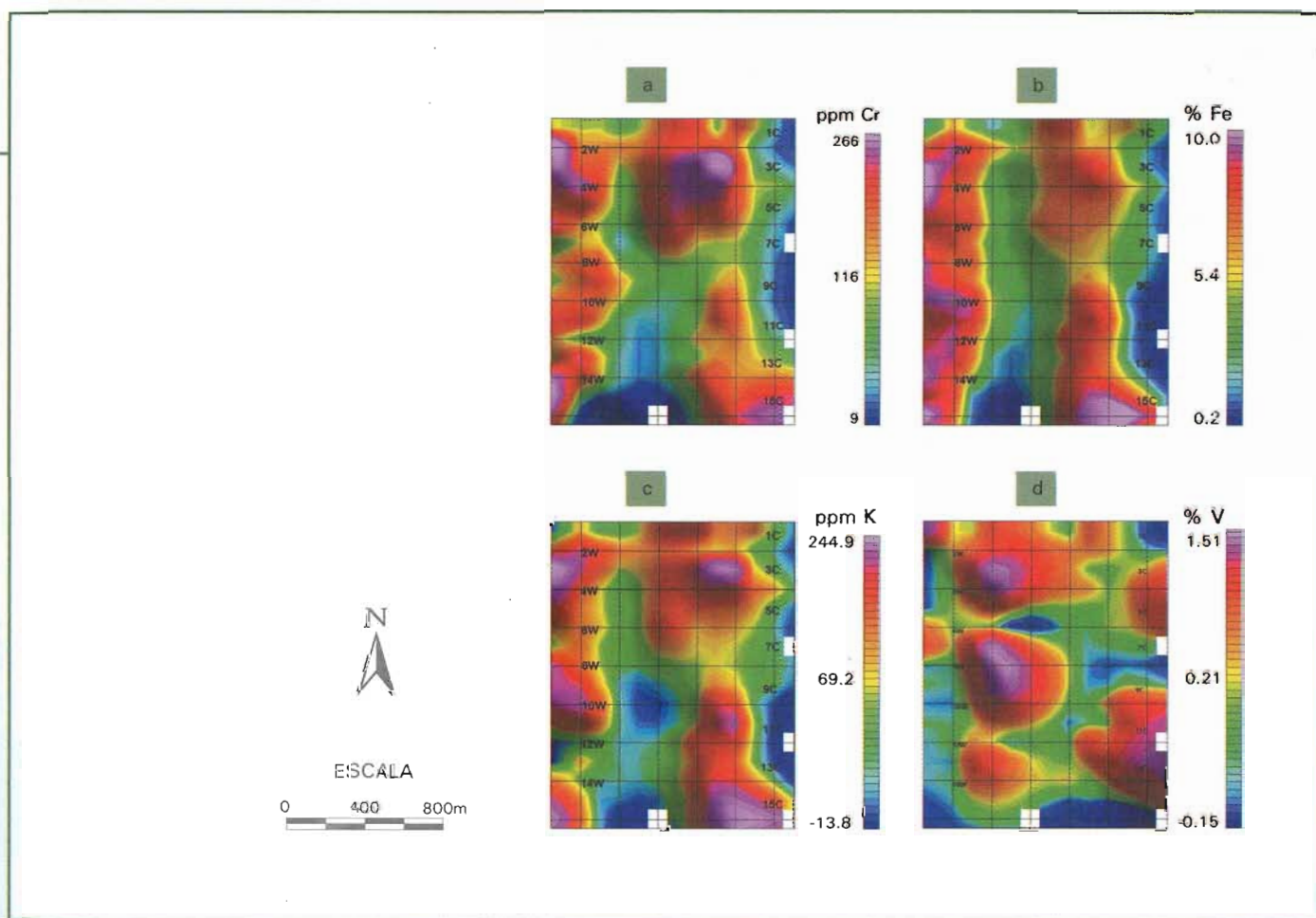


Entre os 31 mapas de isoteores, apresentam-se aqui oito mapas dos elementos químicos típicos para a delimitação de granitos e rochas metaultramáficas, tais como **Ba** (Figura 10a), **Cd** (Figura 10b), **Li** (Figura 10c), **Mn** (Figura 10d), **Cr** (Figura 11a), **Fe** (Figura 11b), **K** (Figura 11c), e **V** (Figura 11d). Ressalta-se, nessas figuras, a grande correlação entre os teores elevados de Ba, Li e K (Figuras 10a, 10c e 11c) e de Cd, Mn, Cr, Fe e V (Figuras 10b, 10d, 11a, 11b e 11d) relacionados, respectivamente, à presença dos granitos e da seqüência vulcano-sedimentar.

Todos os resultados apresentados nas Figuras 10 e 11 concordam com os trabalhos de mapeamento geológico e geofísico, ou seja, os corpos graníticos e a seqüência vulcano-sedimentar estão muito bem definidos. O padrão mostrado pelo Ba, similar aos resultados do levantamento geofísico, indica um corpo granítico (alto teor de Ba) na parte Oeste da área. Nos demais mapas de isovalores, pode-se observar a estruturação das litologias, na direção Norte-Sul.

O Cr (Figura 11a), um elemento característico de seqüência ultramáfica e o principal cromóforo das esmeraldas, mostra valores anômalos na porção Oeste da área analisada. Uma grande anomalia foi observada na região Central, indicando uma possível seqüência metaultramáfica, não delimitada pelos outros métodos de prospecção empregados.

Figura 11. Mapas geoquímicos obtidos na região de Itabira / Nova Era, Estado de Minas Gerais, apresentando os isovalores de Cr (a), Fe (b), K (c) e V (d).



Os resultados geoquímicos mostraram, similarmente aos métodos anteriormente descritos, duas faixas de seqüência vulcano-sedimentar alternadas por rochas graníticas.

Quando amostrado a 30cm, o Be (um elemento muito importante na mineralização esmeraldífera), não apresentou anomalias relevantes que permitissem a apresentação dessa carta de isotores.

Sondagem Rotativa

Finalizando a etapa de prospecção, foram verificadas a ocorrência e a continuidade dos litotipos mapeados em superfície, por sondagem rotativa do mapeamento geológico e geoquímico, e em subsuperfície de baixa profundidade, obtidos pela sondagem a trado e a geofísica. Assim, efetuaram-se quinze furos de sondagem rotativa, que, além de fornecer testemunhos para uma descrição detalhada dos litotipos atravessados, permite amostrar para análises geoquímicas, a profundidades maiores do que a alcançada pelo trado, atingindo em média uma profundidade de 120m. Todas elas foram locadas nas duas faixas da seqüência vulcano-sedimentar.

Um bom exemplo desse método é apresentado na sondagem E1, que perfurou várias camadas de biotita/flogopita xisto, em que as amostras analisadas mostraram altos teores de elementos cromóforos e indício de percolação de solução metassomática e/ou hidrotermal, como detalhado a seguir.

A Tabela 1 exemplifica os resultados geoquímicos de duas sondagens rotativas, E1 e E2, apresentando os teores de Ba, Be, Cr,

Tabela 1

Teores de Ba, Be, Cr, Fe, K, Mg e V, obtidos por ICP, nos níveis metaultramáficos amostrados nas sondagens rotativas E1 e E2

Amostra	Ba	Be	Cr	Fe	K	Mg	V
	ppm	ppm	ppm	%	%	%	ppm
E1-41,40m	439	9,5	571	6,4	3,1	4,2	120
E1-33,40m	4,2	< 1,0	81	6,9	0,01	0,02	210
E1-43,40m	420	1,9	67	3,4	1,4	2,0	21
E1-40,40m	428	10	539	6,8	2,9	3,6	96
E1-42,40m	361	9,1	356	6,3	2,6	3,5	96
E2-46,40m	493	< 1,0	21	5,0	2,0	0,96	4,5
E2-43,40m	432	< 1,0	48	5,9	1,4	0,64	5,1
E2-47,40m	714	< 1,0	18	6,2	2,1	0,79	5,9
E2-45,40m	646	< 1,0	26	5,7	2,0	0,71	4,9
E2-44,40m	652	< 1,0	182	5,9	1,9	0,72	5,3



Fe, K, Mg e V, em profundidades diferentes. As rochas metaultramáficas, quando percoladas por fluidos pegmatíticos, podem apresentar anomalias que não lhe são originalmente características, todavia detectam o hidrotermalismo/metassomatismo.

Sabe-se que as metaultramáficas, mesmo quando metassomatizadas por fluidos ácidos não pegmatíticos, mostram teores máximos de 2.200ppm de Cr; 6,3 % de Fe, 17 % de Mg e 140 ppm de V. Em relação a essas metaultramáficas, o Ba alcança valores de até 38 ppm, o K até 0,05 % e o Be, no máximo, 0,2 ppm (Roeser 1987).

Analisando-se inicialmente os resultados obtidos na sondagem rotativa E1, observa-se que o elemento Ba mostra valores superiores a 360 ppm; o Be e o K apresentam-se com teores mínimos de 1,9 ppm e de 1,4 %, respectivamente. Dessa forma, pode-se concluir que os níveis de rochas metaultramáficas amostrados em E1 apresentam características de percolação por fluido pegmatítico. Em relação ao nível E1-33, 40m, os valores de Ba, Be e K indicam a não percolação desse fluido.

Quanto aos resultados verificados em E2, embora os valores de Ba e K caracterizem a percolação de fluidos, o Be apresenta-se com baixos teores, indicando uma não percolação de soluções pegmatíticas ricas em berílio, e, conseqüentemente, impossibilitando a mineralização de esmeralda.

Considerações Finais sobre a Prospeção

O mapeamento geológico tornou possível a delimitação preliminar das rochas graníticas pertencentes ao Granito Borrachudos e das metaultramáficas da seqüência vulcano-sedimentar (Figura 4). A partir dessa diferenciação litológica, foi possível elaborar todos os passos subseqüentes da pesquisa.

Quanto ao mapeamento geofísico, foram detectadas duas faixas distintas de seqüência vulcano-sedimentar separadas por um corpo granítico (Figuras 6 e 8). Verificou-se que o contato entre esses dois tipos litológicos sempre é por falhas, facilitando a percolação de fluidos berilíferos oriundos dos corpos pegmatíticos. Esses fluidos, ao percolarem as rochas metaultramáficas da seqüência vulcano-sedimentar, poderão propiciar a mineralização de esmeralda. A forma sigmoidal, observada na seqüência vulcano-sedimentar, indica o comportamento reológico (dúctil) dessas litologias mediante o campo de tensão, conseqüentemente, espera-se um espessamento das metaultramáficas.

A sondagem a trado mecanizado mostrou-se muito eficaz na referida pesquisa, porque permitiu obter informações com precisão métrica do contato entre a seqüência vulcano-sedimentar e o granito. A partir desse método, foi possível detalhar o mapa geológico da área (Figura 8) e selecionar amostras para análises geoquímicas, as quais permitiram, posteriormente, a confecção das cartas de isotores.

Em relação à geoquímica, baseando-se no conhecimento das inter-relações entre o conteúdo de berílio e os corpos graníticos, e os cromóforos e as metaultramáficas, foram caracterizadas as duas faixas metaultramáficas separadas por rochas graníticas, corroborando os outros resultados obtidos.

A partir da amostragem na sondagem rotativa, delimitaram-se níveis anômalos em berílio, caracterizando a atuação de processos hidrotermais/metassomáticos em alguns níveis das metaultramáficas.

Ressalta-se que essa metodologia sistemática resultou, na área prospectada, após a lavagem do material xistoso retirado de galeria, na descoberta de vários cristais de esmeralda, alguns de qualidade gemológica.

Bibliografia Consultada

- Alkmim, F. F. & Endo, I. 1998. An outline of the geology of the southern São Francisco Craton region. In: Alkmim, F. F. & Endo, I. (eds.). Guide to the geology of the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil. INTERNATIONAL CONFERENCE ON BASEMENT TECTONICS, 14, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. 1-23.
- Benson, A.K. 1995. Applications of GPR in assessing some geological hazards: examples of ground water contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*, 33:177-193.
- César-Mendes, J. 1989. Aspectos mineralógicos, geológicos e econômicos da esmeralda de Santa Terezinha de Goiás. USP, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 163p.
- César-Mendes, J. 1995. Mineralogia e gênese dos pegmatitos turmalíferos da Mina do Cruzeiro, São José da Safira, Minas Gerais. USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 260p.
- César-Mendes, J. & Ferreira Jr, P. D. 1998. Os Garimpos de Monte Santo, TO: uma nova descoberta de esmeralda no Brasil. *Revista Escola de Minas*, 51(2): 30-35.
- César-Mendes, J. 2000. History of the brazilian emerald findings. In: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro, Field Trip Guide... Rio de Janeiro, Field Trip Aft20, 58p.
- Couto, P. A. & Almeida, J. T. 1982. Geologia e mineralizações na área do Garimpo de Carnaíba, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, Salvador, Anais... Salvador, SBG, 3: 850-861.
- Couto, P. A. - 1985 - Garimpo de Esmeralda de Socotó. MME/DNPM, 14p.
- Daniels, D.J.; Gunton, D.J. & Scott, H.F. 1988. Introduction to subsurface radar. *Proceedings of the IEEE*, 135 (part F, N. 4): 277-320.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- Fisher, E.; Mcmechan, G.A. & Annan, A.P. 1992. Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar. *Geophys*, 57: 495-504.
- Fleischer, R. 1972. Origin of topaz deposits near Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. *Discussions. Economic Geology*, 67(1): 119-120.
- Hara, T. & Sakayma, T. 1985. The applicability of ground probing radar to site investigations. *OYO, RP- 4159*, 32 p.
- Huggenberger, P.; Meier, E. & Pugin, A. 1994. Ground probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data - processing and facies analysis. *Journal. of Applied Geophysics*, 31:171-184.
- Johnston Jr, W. D. 1945a. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no nordeste do Brasil. *Boletim 72, DNPM/DFPM* - Rio de Janeiro, 83p.
- Johnston Jr, W. D. 1945b. Pegmatitos ambligonita-berilo-tantalíferos do Ceará, nordeste do Brasil. *Boletim 66, DNPM/DFPM* - Rio de Janeiro, 44p.
- Machado, G. A. A. - 1998 - Jazida de esmeralda de Capoeirana e Belmont - MG: geologia, petrogênese e metalogênese. USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 294p.
- Marciano, V. R. P. R. O. 1995. O Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG: mineralogia, geoquímica e zonedificação. USP, São Paulo, Tese de Doutorado, 216p.
- Neto, C. ; Araujo, M. C.; Pinto, C. P.; Drumond, J. B. V. 1999. Cadastramento de ocorrências minerais da região leste de Minas Gerais - Província Pegmatítica Oriental. Belo Horizonte, SEME/COMIG/CPRM, 217 p. (in press).
- Paiva, G. 1946. Províncias Pegmatíticas do Brasil. *Boletim. DNPM/DFPM*, 78: 13-21.
- Pedrosa-Soares, A. C.; Dardenne, M. A.; Hasui, Y.; Castro, F. D. C.; Carvalho, M. V. A. 1994. Nota explicativa do mapa geológico, metalogenético e de ocorrências minerais do Estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000. Companhia Mineradora de Minas Gerais (COMIG), 97p.



Roeser, H. 1987. Metassomatismo de rochas ultramáficas - a tentativa de uma quantificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, I, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, SBGq, 1: 217-232.

Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Asmus, H. E. 1984. Mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente. Brasília: MME/DNPM.

Schorcher, H. D.; Santana, F. C.; Polonia, J. C.; Moreira, J. M. P. 1982. Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais State: Rio das Velhas greenstone belt and proterozoic rocks. Excursions anex, ISAP, Brazil, 44p.

Souza, J. L. 1988. Mineralogia e geologia da esmeralda da Jazida de Itabira, MG. USP, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 192p.

Souza, J. L.; César-Mendes, J.; Bello, R. M. S.; Svisero, D. P.; Valarelli, J. V. 1992. Petrographic and microthermometrical studies of emeralds in the 'Garimpo' of Capoeirana, Nova Era, Minas Gerais State, Brazil. Mineralium Deposita, 27: 161-168.

Souza, J. L.; César-Mendes, J.; Svisero, D. P. 1987. Aspectos mineralógicos e geológicos das esmeraldas brasileiras. Revista Escola de Minas, 40(3): 18-26.

capítulo sete

Turmalinas

Cristiane Castañeda

Júlio César Mendes

Antônio Carlos Pedrosa Soares

I n t r o d u ç ã o

Nenhuma outra gema possui uma gama de cores tão ampla como a turmalina. Apesar de, na Antigüidade, ser conhecida na região mediterrânea, foram os holandeses que a introduziram na Europa em 1703, na forma de cristais procedentes do Sri Lanka (Branco, 1984).

O nome turmalina parece ser derivado da palavra cingalesa *turmali*, uma designação aplicada pelos mercadores do Sri Lanka quando misturavam gemas de identificação duvidosa às de mais alto valor. Hoje, a palavra turmalina é usada para designar um grupo de minerais e é também aplicada, de modo genérico, às variedades desse grupo, quando não se conhece a composição química correta, o que impossibilita a identificação da espécie individual do grupo (Dietrich, 1985).

Na classificação gemológica da turmalina, em que se considera apenas a cor, tem-se as seguintes variedades:

- acroíta - incolor ou quase incolor
- rubelita - rosa ou vermelha, ocasionalmente com matiz violeta
- dravita - amarelo acastanhado a amarelo escuro
- verdelita - todos os matizes de verde
- indicolita ou indigolita - todos os matizes de azul
- siberita - vermelho lilás até azul violeta
- schorlita ou schorl - preta

Além das diversas espécies de turmalinas e de suas variedades gemológicas, vários termos são atribuídos a esse conjunto de minerais. Um deles é a afrizita, nome não reconhecido pela International Mineralogical Association (IMA), mas muito utilizado pelos mineradores de Minas Gerais. Tal nome, utilizado por José Bonifácio de Andrada e Silva em 1800, para homenagear o seu escravo de nome Afrizio, que lhe trazia amostras de diversos minerais, refere-se a uma turmalina de coloração preta (Branco, 1984).

Desde o período Colonial, quando foram descobertos os primeiros cristais, o Brasil tornou-se um dos maiores produtores mundiais de turmalinas gemológicas. Minas Gerais, onde são encontradas todas as variedades de cores do espectro, destaca-se como o maior produtor brasileiro dessa gema. Duas áreas são consideradas as mais importantes no estado: a Norte, Araçuaí, compreendendo as regiões de Taquaral, Virgem da Lapa, Coronel Murta e Barra do Salinas; e, a Sul, São José da Safira e Conselheiro Pena, sendo Governador Valadares a principal cidade (Figura 1).

Figura 1. Localização das principais áreas produtoras de turmalina em Minas Gerais

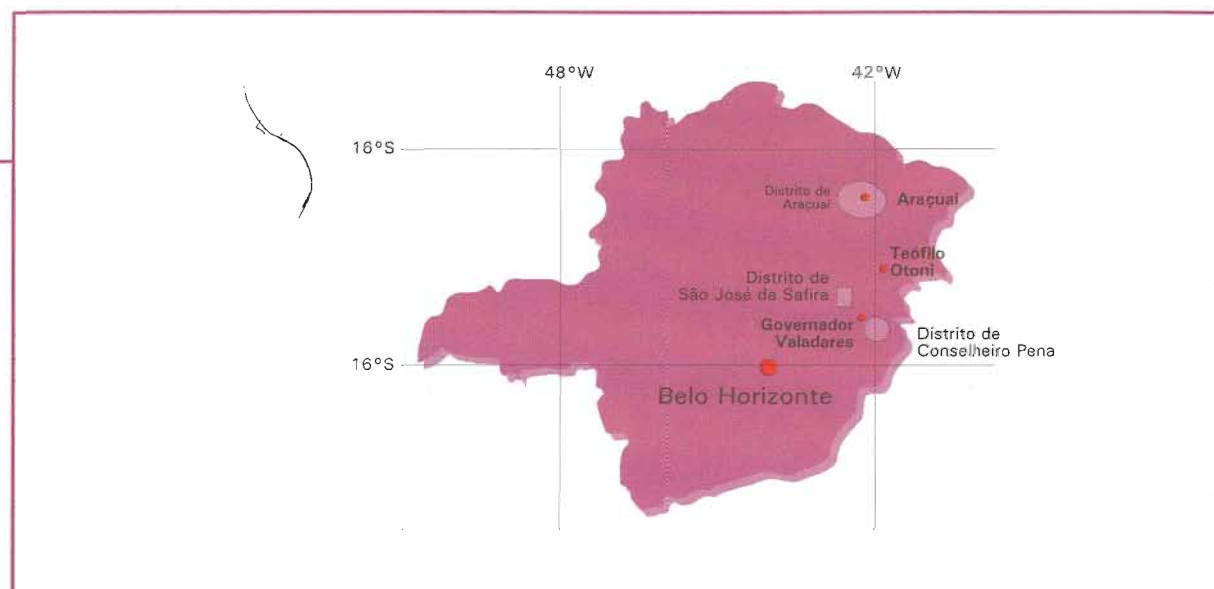


Foto 1. Cristal de turmalina multicolor, com 15 cm de altura, proveniente de Salinas. Coleção do Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas de Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

155

A descoberta da turmalina no Estado de Minas Gerais ocorreu durante uma expedição em 1674, quando o bandeirante Fernão Dias Paes Leme encontrou a Serra Resplandescente ou do Cruzeiro, onde estaria a primeira ocorrência de esmeralda, uma gema muito procurada pelos portugueses no lado Leste do continente sul-americano. Após a descrição da gema, provou-se tratar apenas de uma variedade de turmalina, a verdelita, cuja ocorrência ficou abandonada até o início do século XX. A partir de 1914, uma lavra rudimentar foi iniciada visando à retirada de turmalinas gemológicas. Entretanto, o real início da mineração na Serra do Cruzeiro só veio com a chegada da 2ª Guerra Mundial, devido à grande demanda de mica pelos países aliados. Nesse período, o Estado de Minas Gerais supriu quase um quarto das necessidades desse mineral. Finalizada a guerra, todos os trabalhos de exploração voltaram-se para as gemas e, nos dias atuais, esse distrito é um dos maiores produtores de turmalinas do mundo.

No início do século XIX, surgiu um pequeno lugarejo no pé da Serra do Cruzeiro, São José da Safira. No nome desse lugarejo há um engano, uma vez que as turmalinas violetas retiradas nos pegmatitos da região foram erroneamente identificadas. Num raio de 20km dessa cidade, ocorrem centenas de corpos pegmatíticos. Em aproximadamente uma dezena deles, as atividades extrativas objetivando a obtenção de minerais industriais e, sobretudo, de gemas têm sido uma constante, principalmente por parte dos garimpeiros. Pode-se afirmar que essa região é uma das maiores produtoras mundiais de turmalinas gemológicas.

A região de Araçuaí tornou-se famosa mundialmente nos últimos vinte anos pela grande produção e variedades de cores de suas turmalinas gemológicas. Destacam-se duas áreas distintas em relação à cor predominante: Araçuaí/Itinga, onde os tons são verdes e azuis; e Araçuaí/Salinas, vermelhos e multicoloridos. Um dos garimpos mais famosos foi o de Ouro Fino, cujas rubelitas de cor cereja, semelhante a rubi, tornaram-se um padrão mundial de cor, utilizadas como *touchstone*.

Na região de Conselheiro Pena, há vários pegmatitos produtores de turmalinas. Um dos mais famosos é a lavra do Jonas, descoberto em 1930, na Serra do Itatiaia. Foi retirada grande quantidade de turmalinas coradas e amostras de coleção, as quais encontram-se em grandes museus europeus. Em 1978, um grupo de garimpeiros encontrou um caldeirão de forma oval, medindo 3,0 x 3,0 x 2,5m, preenchido por grandes cristais de rubelitas intercrescidos com quartzo, albita e lepidolita. Dentre as principais peças, destacaram-se quatro grandes cristais denominados de Joaninha, Tarugo, Foguete e Flor-de-Liz, pesando, respectivamente, 325, 80, 135 e 32kg.

As turmalinas são chamadas de *lata de lixo da natureza*, em função da quantidade de elementos químicos que podem ser incorporados a sua estrutura. Sua grande variação química, resultante da facilidade com que ela agrega os mais variados elementos, é uma ferramenta importante que permite a sua utilização como indicador petrogenético. Em função disso, formam um grupo mineral em que a maioria das espécies pode apresentar variedades gemológicas.



Foto 2. Alguns exemplares lapidados de turmalinas coloridas: rubelita, indigolita, verdelita e bicolor. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Licardo).

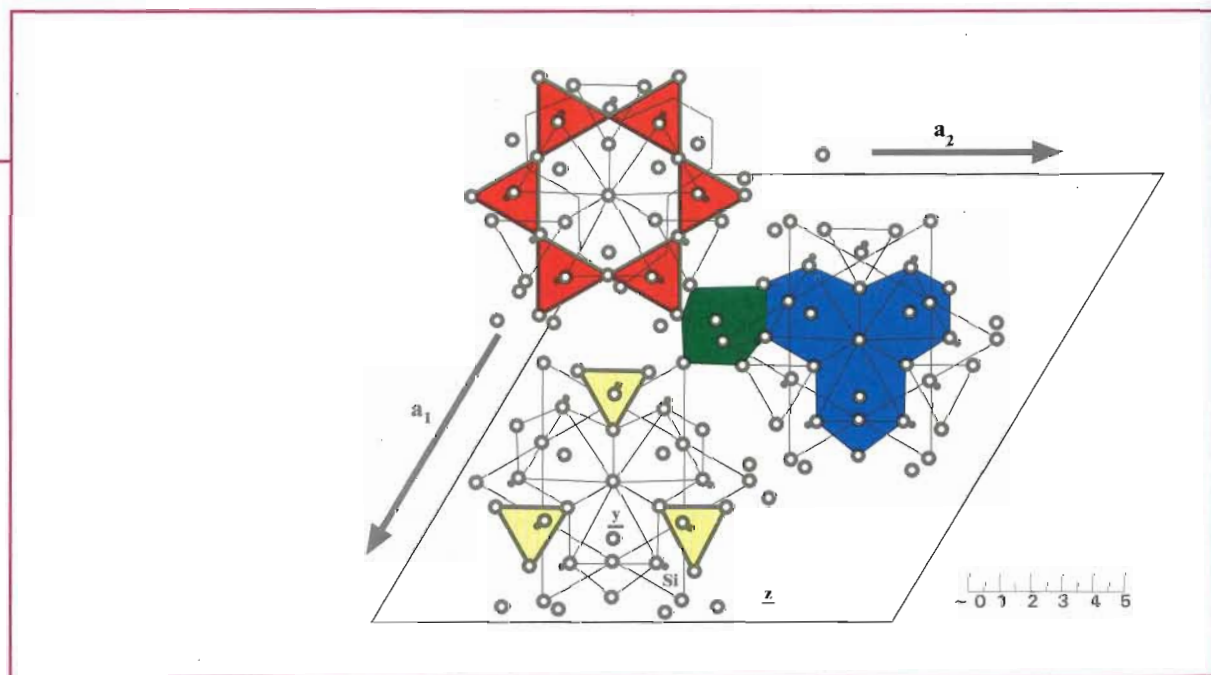
O Grupo da Turmalina

Mineralogia

Os minerais do grupo da turmalina cristalizam-se na classe piramidal trigonal do sistema trigonal, cujo grupo espacial é representado por $R\bar{3}m$. As dimensões da cela unitária são calculadas por hipóteses das modificações ordenadas e desordenadas das várias espécies e estudadas com base nos diagramas de Epprecht (1953) e Donnay & Barton (1972). Todas elas exibem uma relação específica entre os parâmetros que caracterizam sua posição nas séries isomórficas, em que cada ponto corresponde às variações composicionais e ao grau de ordenamento da estrutura.

As turmalinas podem ser expressas pela fórmula geral $XY_3Z_6(BO_3)_3(T_6O_{18})V_3W$ (Hawthorne & Henry 1997), representando um grupo de minerais isomorfos. Tal fórmula representa os sítios cristalográficos dentro de uma unidade assimétrica da estrutura da turmalina (Figura 2). O sítio X, poliédrico, é ocupado por cátions alcalinos, geralmente Na^+ , mas também acomoda íons Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} ou, ainda, mantém-se vazio. Dos sítios Y e Z, Z é menor e mais distorcido, usualmente ocupado por Al^{3+} e quantidades significativas de Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg , Cr^{3+} e V^{3+} ; enquanto Y permite diversas e extensivas substituições, envolvendo Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Li^+ , Fe^{3+} ,

Figura 2. Modelo da estrutura cristalina da turmalina projetada em [001]. Tetraedros vermelhos = anel hexagonal de SiO_4 ; triângulos amarelos = BO_3 ; octaedro verde = sítio Z; octaedro azul = sítio Y; pontos negros = silício e círculo branco = oxigênio.





Mn²⁺, V³⁺, Cr³⁺ e Ti⁴⁺. O boro, em coordenação triangular regular, aparentemente, não sofre substituição. O sítio T, tetraédrico, é predominantemente ocupado por Si, cuja concentração pode ser menor que seis átomos por fórmula unitária (*apfu*), permitindo a acomodação de quantidades significativas de Al^{IV}. Os dois sítios restantes, V e W, acomodam ânions monovalentes (OH, F) e/ou divalentes (O²⁻), sendo V ocupado por OH e O²⁻ e W, por OH, F e O²⁻ ou, ainda, manter-se vazio.

Os minerais do grupo da turmalina são sempre considerados em termos de membros finais devido à grande diversidade e extensão das substituições entre seus constituintes. Trata-se de um grupo extensivamente estudado e em contínua redefinição de seus membros. Atualmente, são definidas 13 espécies principais, enquanto que no início da década de 90 do século passado, somente 9 eram conhecidas. A última revisão publicada sobre os membros finais da turmalina encontra-se na Tabela 1. Entretanto, a classificação elaborada por Hawthorne & Henry (1997), com base na determinação das populações dos diferentes sítios, considera até 29 espécies

Tabela 1

Classificação dos membros finais do grupo da turmalina (Hawthorne & Henry 1999).

Espécies	(X)	(Y ₃)	(Z ₆)	T ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	V ₃	W
Turmalina alcalina							
Elbaíta	Na	Li _{1,5} Al _{1,5}	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Dravita	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Cromodravita	Na	Mg ₃	Cr ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Schorlita	Na	Fe ²⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Olenita*	Na	Al ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	O ₃	(OH)
* Buergerita	Na	Fe ³⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	O ₃	F
Povondrait♦	Na	Fe ³⁺ ₃	Fe ³⁺ ₄ Mg ₂	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Turmalina cálcica							
Uvita	Ca	Mg ₃	Al ₅ Mg	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Hidróxi-ferruvita**	Ca	Fe ²⁺ ₃	Al ₅ Mg	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Lidicoatita	Ca	Li ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Turmalina com vacância no X							
Rossmanita		LiAl ₂	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Foitita*		Fe ²⁺ ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Magnesiofoitita		Mg ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)

* Modificados dos originais para definir membro final

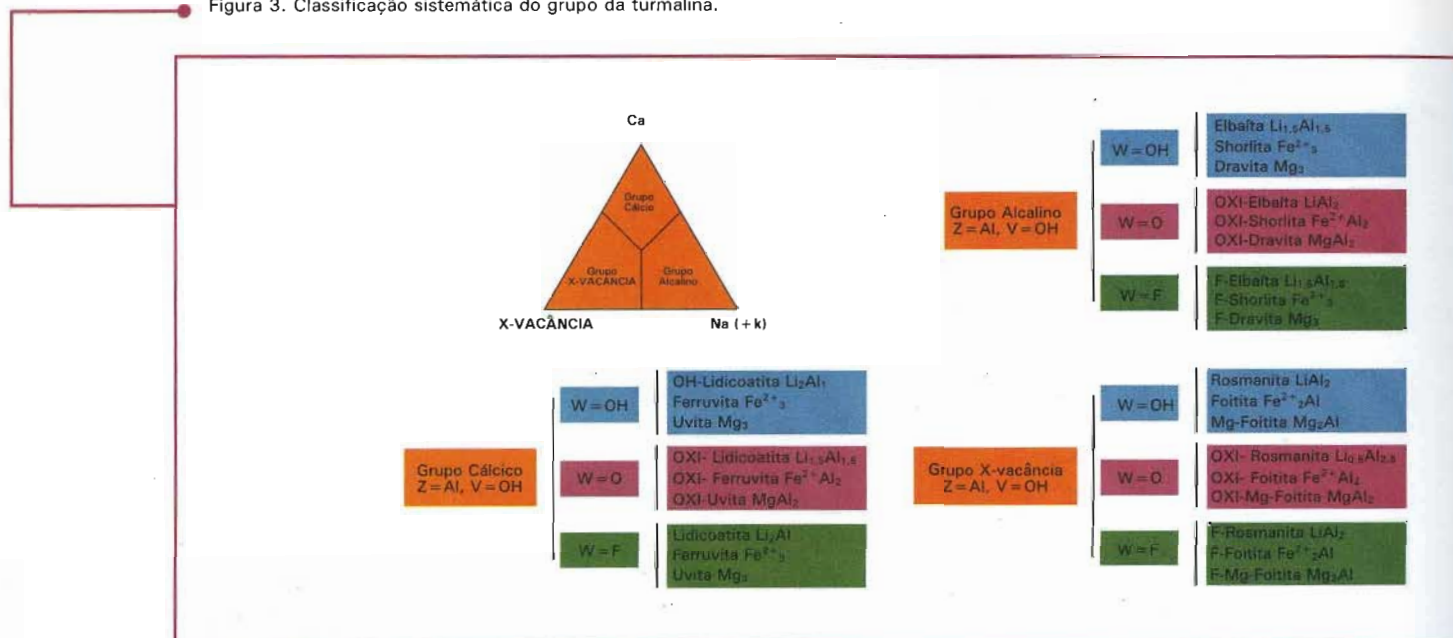
♦ Original ferrodravita

** Original ferruvita

partindo dos 13 membros finais desse grupo. O primeiro passo para reconhecer a espécie é determinar a ocupação dominante do sítio X, classificando-as em turmalinas alcalinas (Na + K dominante), cálcicas (Ca dominante) ou com vacância [], constituindo os três subgrupos principais. Em seguida, os subgrupos principais são divididos em mais três subgrupos secundários, designados por hidróxi-fluór- ou óxi-turmalina, em função da ocupação dos sítios W e V. As demais designações são decorrentes da ocupação preferencial dos sítios Y e Z (Figura 3).

Os membros-finais desse grupo constituem séries isomórficas completas e parciais. As quatro principais séries são a elbaíta-schorlita, a schorlita-dravita, a elbaíta-liddicoatita e a dravita-uvita. Entretanto, outros dois tipos diferentes de substituição podem ocorrer nessas séries; denominados desidroxilação $[(OH)^- + R^{2+} = O^{2-} + R^{3+}]$ e deficiência de álcalis $[R^+ + R^{2+} = [] + R^{3+}]$. Essas substituições produzem membros intermediários no grupo, determinando uma nova série definida pelo membros finais deficientes em prótons $[R^+R_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}O_3(OH)]$ ou sem álcalis $[[]R_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}O_2(OH)_2]$.

Figura 3. Classificação sistemática do grupo da turmalina.



Causas de cor

Os minerais do grupo da turmalina caracterizam-se por ocorrerem em todas as cores do espectro visível devido, principalmente, às diversas substituições químicas que podem ocorrer. Além disso, em um mesmo cristal podem ser facilmente observáveis duas, três ou mais matizes de cores diferentes, variando paralelamente ou perpendicularmente ao eixo cristalográfico *c* do cristal.

Devido ao grande número de tonalidades e cores, as turmalinas sempre confundiram os leigos, possibilitando que elas fossem identificadas, muitas vezes como outra gema. Um exemplo clássico aconteceu no início do desbravamento do interior do Brasil, quando o bandeirante Fernão Dias Paes Leme, ao procurar esmeralda, encontrou as turmalinas verdes da Serra Resplandescente. Esse desbravador morreu convencido de haver atingido o objetivo de sua busca. Tal fato justifica que, ainda nos dias atuais, a turmalina verde seja conhecida, erroneamente, como esmeralda brasileira.

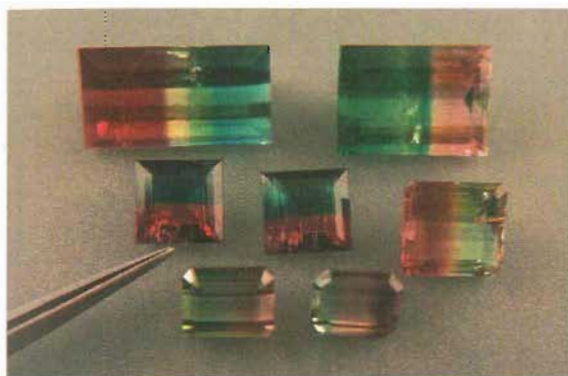


Foto 3. Exemplos lapidados de turmalina bicolor. O exemplar maior pesa 44 quilates. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

Um bom exemplo da diversidade de cores das turmalinas pode ser visto no escritório do Sr. Kalil Elawar, em Teófilo Otoni, Minas Gerais. Esse comerciante possui um mostruário de turmalinas brutas e lapidadas com cerca de 200 matizes de cores diferentes.

A origem das cores das turmalinas é um dos assuntos para o qual ainda não existe consenso nos meios científicos. Embora várias inferências a respeito das diferentes cores tenham sido feitas a partir dos anos 60 do século XX, nenhuma conclusão definitiva foi obtida.

Foto 4. Turmalina verde, que durante algum tempo, foi denominada de esmeralda brasileira. (Foto: Cristiane Castañeda).





Foto 5. Variedades gemológicas dos minerais do grupo da turmalina. Amostras lapidadas rosa, azul e verde da coleção particular de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

As cores azuis, verdes e amarelas das turmalinas foram atribuídas às interações do ferro e do titânio. O azul é sempre devido ao ferro, seja como Fe^{2+} ou em processos de transferência de carga $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, ao passo que aos mecanismos de transferência de cargas do tipo $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ e $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Ti}^{4+}$ foram atribuídos a causa da cor verde e matiz do amarelo, sendo que pequenas concentrações de Ti^{4+} , substituindo o Fe^{2+} , aumentam a intensidade de amarelo.

Em relação à cor rosa, embora mineralogistas atribuam-na diretamente à presença do manganês ou a mecanismo de transferência de carga, alguns trabalhos descrevem turmalinas rosa sem correlação com o conteúdo desse elemento. Existem hipóteses em que a cor rosa está relacionada ao conteúdo de Fe^{3+} , ou ao conjunto de $\text{Mn} + \text{Cs} + \text{Li}$, ou ao conteúdo de Mn^{3+} e/ou Mn^{2+} .



Foto 6. Turmalinas verdes lapidadas em cabochão mostrando o efeito olho-de-gato. (Foto: Antonio Liccardo).



com traços de ferro. Atualmente, sabe-se que o Mn^{3+} em pequenas quantidades é um forte cromóforo, enquanto são necessárias maiores quantidades de Mn^{2+} para produzir o mesmo efeito. Centros de cor de O⁻ metaestáveis, centros de cor do tipo elétron do Mn^{4+} e Mn^{3+} e transições eletrônicas de metais de transição (Mn^{3+}) também podem ser responsáveis por essa cor (Bershov *et al.* 1969).

Alguns efeitos ópticos também podem modificar ou criar diferentes nuances nas turmalinas, através da interferência da luz nas características físicas do cristal. Esses processos não são correlacionados diretamente com a composição química da gema, mas sim com a textura ou com o arranjo interno do mineral. O efeito olho-de-gato (*chatoyance*), por exemplo, pode ser produzido através da reflexão, causada pela presença de inúmeras inclusões cristalinas e fibrosas ou canais preenchidos por fluidos dispostos perpendicularmente ao eixo c do cristal, os quais produzem por meio da reflexão, o efeito olho-de-gato.

Sintetizando, cada vez que se faz um trabalho acurado em turmalinas, são encontrados novos elementos químicos ou mecanismos como possíveis causadores de cor. É apresentado, neste capítulo, um estudo sobre a caracterização da cor das turmalinas de Minas Gerais na próxima seção, desse Capítulo.

As Turmalinas de Minas Gerais

As turmalinas do Nordeste mineiro têm sido objeto de estudo desde o final dos anos sessenta do século XX. Os primeiros trabalhos relatam a geologia dos depósitos, enfatizando a proveniência das turmalinas coradas. Por outro lado, os trabalhos mais recentes mostram o grupo da turmalina como um dos principais exemplos de variação composicional e identificam a elbaíta como a principal espécie que forma as variedades gemológicas, de origem pegmatítica. Além disso, as investigações das características morfológicas, químicas e estruturais também demonstram que ela pode ser usada como um indicador petrogenético para entender a evolução interna dos corpos pegmatíticos, assim como avaliar o seu potencial metalogenético. A integração desses resultados permite definir os processos causadores de cores e as tendências das variedades gemológicas mais comuns nos campos pegmatíticos.

Caracterização Química e Estrutural

A determinação da composição química das turmalinas não é um procedimento trivial. A utilização de microsonda eletrônica reduziu, significativamente, os problemas derivados do zonamento composicional. Porém, problemas relacionados à análise de elementos leves e metais de transição ainda permanecem, assim como a distribuição desses elementos nos respectivos sítios cristalográficos. Informações complementares por outros métodos para se chegar à fórmula estrutural correta são necessárias, tais como ressonância paramagnética eletrônica (EPR), espectroscopia Mössbauer e de absorção óptica, além de outras técnicas espectroscópicas.

A Tabela 2 apresenta a composição média de análises químicas obtidas a partir de microsonda eletrônica em cristais, zonados ou não, provenientes dos distritos citados. Os elementos Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ti, Na, Ca e K foram considerados elementos maiores e subordinados, os demais elementos apresentados são traços. Os conteúdos de Li e OH foram calculados estequiometricamente ou dosados por ICP (espectroscopia de plasma).

A avaliação dos dados químicos revela variações cristaloquímicas, principalmente nos conteúdos de Fe^{2+} e Li^+ , corroborando os resultados obtidos no cálculo dos parâmetros de cela unitária ($a = 16,014 - 15,768 \text{ \AA}$, $c = 7,149 - 7,077 \text{ \AA}$), pelos quais todas as turmalinas analisadas pertencem à série schorlita-elbaíta.

De um modo geral, as turmalinas analisadas apresentam teores insignificantes de Mg e Ti. O Mn apresenta uma variação em relação às diferentes cores, porém sempre mantendo uma relação negativa com o Fe. O Zn apresenta teores mais significativos nos

Tabela 2

Composição química média de algumas espécies do grupo da turmalina de Minas Gerais.

Turmalinas							
Araçuaí*							
Cor	Branca	Rosa pálida	Verde	Verde grama	Azul claro	Azul marinho	Preta
SiO ₂	37,10	37,90	36,50	35,60	37,36	36,10	34,70
Al ₂ O ₃	43,90	40,80	36,80	38,20	38,74	38,20	33,90
FeO	0,33	0,44	4,34	3,22	2,64	5,80	14,95
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,34
CaO	0,05	0,17	0,09	0,58	0,33	0,11	0,06
MgO	0,10	0,10	0,10	0,34	0,01	0,15	0,90
TiO ₂	0,05	0,05	0,05	0,07	0,01	0,08	0,35
Na ₂ O	1,70	1,90	2,80	2,40	2,51	2,40	1,70
K ₂ O	0,10	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
MnO	0,01	0,44	1,60	1,70	2,01	0,83	0,17
Li ₂ O	1,80	2,40	1,20	2,10	1,46	1,50	0,04
B ₂ O ₃ *	9,30	11,10	10,50	10,30	10,20	10,20	10,20
ZnO	0,33	0,01	0,10	0,08	0,20	0,17	0,26
H ₂ O ⁺	5,15	4,24	3,67	3,60	3,70	3,51	2,09
Total	99,60	99,68	97,78	97,67	99,20	98,90	99,79

Fonte: * Castañeda 1997, ** César-Mendes 1995, *** Coelho 1999

Turmalinas						
São José da Safira**						
Cor	Vermelha	Rosa	Verde claro	Verde escuro	Azul	Preta
SiO ₂	40,88	37,90	39,89	39,35	37,61	37,10
Al ₂ O ₃	42,31	41,95	39,72	40,28	38,44	32,89
FeO	0,07	0,03	1,31	1,22	3,32	11,23
Fe ₂ O ₃	nd		nd	nd	nd	
CaO	0,00	0,69	0,36	0,12	0,03	0,18
MgO	0,00	0,00	0,07	0,04	0,07	3,53
TiO ₂	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,52
Na ₂ O	1,93	1,98	2,51	1,84	2,44	2,15
K ₂ O	0,00	0,01	0,03	0,00	0,03	0,05
MnO	0,37	0,71	3,69	0,20	1,83	0,17
Li ₂ O	2,04	1,18	1,67	1,96	1,61	0,02
B ₂ O ₃ *	10,28	10,30	9,42	10,28	9,42	9,42
ZnO	0,06	0,02	0,09	0,00	0,173	0,27
H ₂ O ⁺	nd	3,79	nd	3,25	2,01	2,01
Total	98,99	98,56	100,70	99,57	98,14	99,91

Turmalinas					
Conselheiro Pena***					
Cor	Rosa	Verde	Verde grama	Azul	Preta
SiO ₂	37,36	37,79	36,60	35,66	36,34
Al ₂ O ₃	42,10	38,16	39,32	38,54	37,59
FeO	0,03	2,06	3,91	6,86	4,52
Fe ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,48	0,30	0,15	0,06	0,07
MgO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
TiO ₂	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03
Na ₂ O	2,02	2,66	2,10	1,94	2,28
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MnO	0,62	0,52	0,52	0,50	0,52
Li ₂ O	0,88	0,48	0,48	0,75	0,48
B ₂ O ₃ *	9,65	12,23	9,65	11,60	10,20
ZnO	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
H ₂ O ⁺	3,70	3,73	3,71	3,46	3,87
Total	97,01	98,04	97,55	99,48	95,98

membros mais schorlíticos. Os demais óxidos estão dentro do padrão da composição estequiométrica dos minerais do grupo da turmalina. Todas essas variações químicas podem ser observadas em um cristal zonado, química e opticamente.

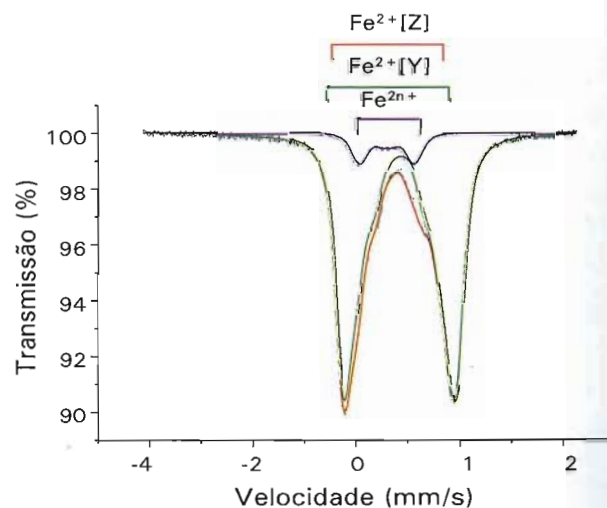
As variações composicionais observadas nas turmalinas permitem dividi-las em três grupos distintos: I, II e III. O primeiro indica cristalização primária de fusões silicatadas ricas em boro, durante a consolidação das zonas mais externas. O segundo caracteriza o estágio de transição entre a cristalização primária e o processo metassomático, devido à liberação de grande volume de boro. Esse estágio é responsável pelo início da geração de caldeirões e preenchimentos de fraturas, onde se cristalizam as turmalinas do grupo III. Essa sequência de cristalização corresponde ao intervalo da série schorlita-elbaíta, caracterizada pela substituição progressiva do Fe^{2+} por $(\text{Li}^+ + \text{Al}^{3+})$, decréscimo abrupto do Mg e Ti e lento do Zn e, também, o aumento do Mn, Na e Ca, formando 3 principais espécies: schorlita, Fe-elbaíta e elbaíta.

Schorlita

A schorlita é a espécie mais abundante na maioria dos pegmatitos. De um modo geral, ela ocorre em todas as zonas primárias, porém a maioria dos cristais é encontrado nas zonas marginal e mural, onde podem atingir até 1m de comprimento ao longo do eixo c. Apresenta-se, predominantemente, em cristal azul escuro a preto, de base larga e prisma trigonal curto. No grupo da turmalina, é a espécie com maior concentração de ferro, entre 8 a 14%, além de pequenas concentrações de outros elementos.

As schorlitas da região de Araçuaí, por meio de espectroscopia Mössbauer, cuja técnica permite avaliar a razão $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ (Figura 4), apresentam conteúdos insignificantes de Fe^{3+} e notável de ferro no estado de valência mista (Fe^{2n+}), além do Fe^{2+} nos dois sítios octaédricos Y e Z. O componente Fe^{2n+} ocorre em zonas verdes de espécime zonada, mas em proporção quatro vezes menor do que nas pretas. As áreas dos subespectros Mössbauer mostram, também, que a distribuição do Fe^{2+} nos sítios Y e Z é equivalente a $\text{Fe}^{2+}[\text{Y}]/\text{Fe}^{2+}[\text{Z}] = 1$.

Figura 4. Espectro Mössbauer de uma schorlita à temperatura ambiente. Os três sub-espectros são atribuídos ao Fe^{2+} no sítio Y e Z e ao Fe^{2n+} .



A distribuição do Fe^{2+} nos sítios Y e Z e a presença considerável de ferro no estado de valência mista indicam a grande interação dos íons na estrutura cristalina, evidenciando o mecanismo de transferência de carga, entre os sítios Y e Z e/ou Y e Y, como o principal fenômeno ocorrido nas schorlitas. Esse processo é o principal causador da gradação de azul-marinho ao preto.

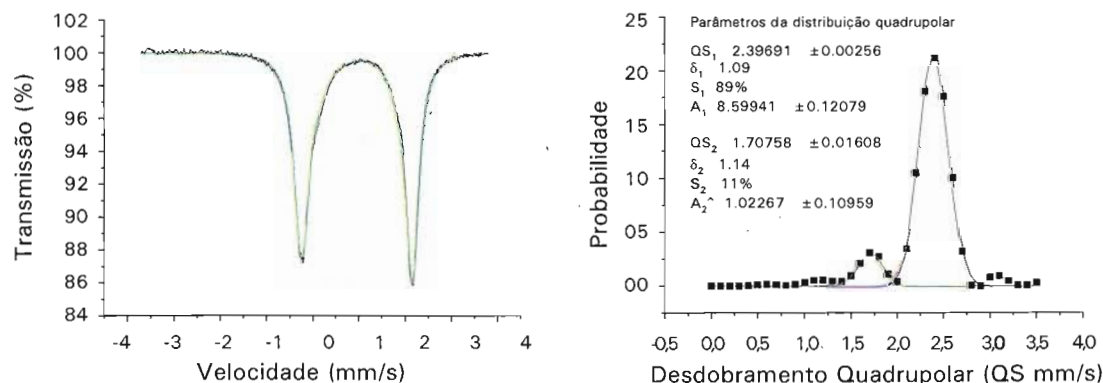
Fe - Elbaíta

A Fe-elbaíta ocorre a partir da zona intermediária e mostra uma nítida diferença composicional em relação aos membros ideais, refletindo a diferenciação das soluções pegmatíticas. Essa espécie torna-se translúcida, permitindo a sua utilização como gema. Apresenta cores que vão desde o azul claro, passando pelo azul esverdeado, atingindo o tom verde. As dimensões de seus cristais variam de 3 a 6cm de comprimento ao longo do eixo c e de 0,5 a 4cm de largura na base. Exibem hábitos e formas diversas, desde cristais prismáticos alongados, biterminados ou terminações planas, até aciculares. Cristais achatados e arredondados são facilmente encontrados, enquanto os curvos e fraturados são raros. Esses últimos podem ser originados devido aos esforços perpendiculares às faces do prisma, causando o dobramento ao longo do eixo c. Nos pontos em que o dobramento é maior, há fratura, normalmente preenchida pela própria turmalina como agregado fibroso, hábito capilar e coloração diferente do cristal dobrado.

Essa espécie é intermediária na série schorlita-elbaíta, mais próxima ao membro final da elbaíta, apresentando, porém, ferro e manganês na sua fórmula estrutural. O decréscimo do componente schorlítico e o conseqüente aumento do elbaítico são concomitantes com a transição da fase primária para a tardia nos ambientes pegmatíticos. Está associada a ripas de espodumênio, aglomerações de mica rosa, cristais de quartzo e massas de albita especular ou cleavelandita. O teor de ferro decresce abruptamente, situando-se ao redor de 2%, o de Ti praticamente desaparece, enquanto o de Li, Mn e Ca aumenta durante essa transição. Os teores de ferro variam de 1,5 a 3,0%, ao passo que os de manganês, de 2,5 a 1,5%, com suas variações relacionadas às cores dos espécimes.

O ferro na Fe-elbaíta tem um comportamento distinto do ferro na schorlita. Os espectros Mössbauer mostram que a contribuição predominante é do Fe^{2+} , nos sítios Y e Z na relação $\text{Fe}^{2+}[\text{Y}]/\text{Fe}^{2+}[\text{Z}] = 4$ (Figura 5). Por outro lado, os espectros de ressonância

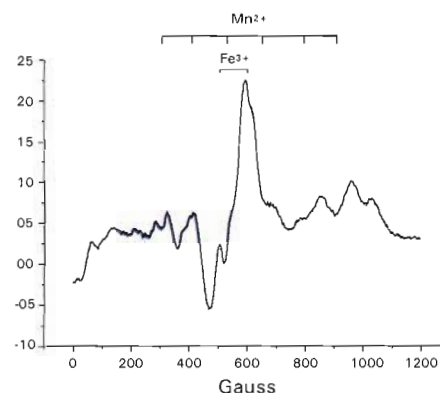
Figura 5. Espectros Mössbauer de uma Fe-elbaíta. A distribuição quadropolar mostra dois valores distintos, atribuídos ao Fe^{2+} nos sítios Y e Z.



paramagnética eletrônica (EPR), cuja técnica permite conhecer elementos em composições traço, mostram a presença de Fe^{3+} e manganês, predominantemente como Mn^{2+} , em todas as cores dessa molécula (Figura 6).

A integração dos dados cristaloquímicos evidenciam apenas que existe uma correlação entre os teores de Fe^{2+} e Mn^{2+} com os vários matizes de cores, sem a presença de outros cromóforos. Um fato estabelecido até o momento é que o conteúdo de Fe^{2+} varia diretamente com o aparecimento de matiz escuro na cor verde.

Figura 6. Espectro de EPR de uma Fe-elbaíta medido em temperatura ambiente com frequência de 9.45GHz.



Elbaíta

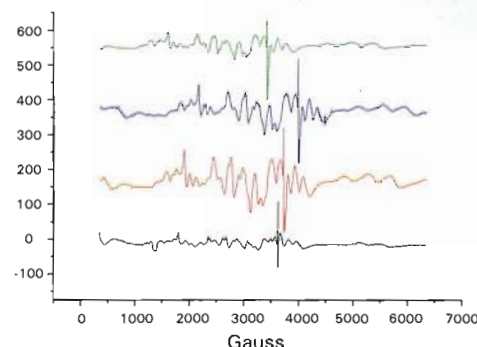
A elbaíta apresenta cores pálidas a intensas e, na maioria da vezes, possui qualidade gemológica. As tonalidades pálidas permitem a aplicação de técnicas de tratamento para intensificação da cor. Entre as gemas, diversas tonalidades transparentes podem ser encontradas, variando desde o verde claro a escuro, azul de vários matizes, rosa, até o vermelho muito intenso. As elbaítas multicores são comuns, mostrando zonamento concêntrico ou variação de cores ao longo do prisma. Os cristais são de tamanho variáveis, os mais comuns entre 0,5 a 1cm de base, e 3 a 5cm de comprimento ao longo do prisma.

Uma variedade muito rara é constituída de cristais prismáticos curvos, fibrosos e as turmalinas vassouras. As turmalinas vassouras, como o próprio nome indica, iniciam-se com um único prisma que se separa em centenas de prismas menores, constituindo-se num agregado cristalino divergente semelhante a uma vassoura.

A elbaíta apresenta pouca variação em relação à fórmula do membro ideal, com exceção dos teores de manganês, que podem estar mais elevados nas variedades de tonalidades avermelhadas. O manganês, assim como o ferro, está presente como elemento menor ou traço, na forma de Mn^{2+} (Figura 7).

Até agora, não foram identificados outros elementos traço importantes para a caracterização de processos de causa de cor na elbaíta. Tudo indica que o Mn^{2+} é o precursor da cor rosa, uma vez que ele é encontrado também nos cristais brancos com tons rosas.

Figura 7. Espectro de EPR de elbaítas medidos a diferentes temperaturas (300-10k) e frequência de 9,45 GHz em cristais com B//c



Caracterização da cor e das propriedades ópticas

O estudo da cor das turmalinas é, ainda, um assunto bastante controvertido na literatura. Devido ao grande número de elementos que podem ser incorporados a sua estrutura, cada vez que é feito um trabalho acurado em novas jazidas, são encontrados novos elementos químicos como possíveis causadores de cores.

Dados químicos e espectroscópicos demonstram os diferentes aspectos relativos aos vários matizes das cores das turmalinas. Sabe-se que o ferro é um dos principais cromóforos das pretas, azuis e verdes, porém a espectroscopia Mössbauer revela diferentes situações em que esse elemento encontra-se na estrutura de turmalinas dessas diferentes cores. Além disso, a variação composicional apresenta diferentes relações entre o ferro e outros íons cromóforos.

A cor preta é fortemente controlada por processos de transferência de carga envolvendo $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$. Esse processo é observado na espectroscopia Mössbauer por subespectros, com valores intermediários do desvio isomérico ($\delta = 1,11 - 0,87\text{mm/s}$) e do deslocamento quadrupolar ($\Delta E_q = 2,04 - 1,16\text{mm/s}$). Esses valores foram associados aos átomos de Fe^{2+} no processo de transferência de carga e pelo Fe^{3+} , observado nos espectros de EPR. As tonalidades escuras da cor azul também são atribuídas aos processos de transferência de carga $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$.

As turmalinas que contêm Fe^{2+} e Mn^{2+} apresentam-se tanto em cristais azuis quanto verdes. O matiz dessas cores não depende das concentrações absolutas de tais elementos, mas, principalmente, da proporcionalidade entre eles. A cor azul está relacionada às pequenas proporções de $\text{Mn}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$, enquanto as verdes tendem a apresentar proporções maiores.

A cor rosa também está relacionada ao ferro e manganês, porém em concentrações de elementos menores ou traço. O aumento de manganês produz variações mais intensas de rosa, sendo esse o precursor da cor. O ferro, provavelmente, atua como compensador de carga e/ou estabilizador do centro de cor ou, ainda, como um causador de tonalidades adicionais à cor original.

O estudo das causas de cor nos minerais do grupo da turmalina pode ser um dos critérios utilizados para estabelecer a designação de campos gemológicos a partir da frequência da cor encontrada nas turmalinas pegmatíticas.

No Distrito de Araçuaí, com base nos conteúdos de manganês e ferro, pôde-se antever que o campo pegmatítico de Coronel Murta poderia constituir-se num campo gemológico à rubelita, já que suas turmalinas apresentam conteúdos mais elevados de manganês e que esse parece ser um dos principais causadores da cor rosa. Por outro lado, a composição química das turmalinas do

campo de Itinga indica um campo gemológico à indicolita, uma vez que a razão Mn/Fe^{2+} é mais baixa. Muitas dessas interpretações ainda são especulativas, pois se faz necessário um maior número de trabalhos visando estabelecer parâmetros seguros para o estabelecimento das causas de cor e das designações de campos gemológicos.

No Distrito de São José da Safira, também ocorre diferença na frequência da cor, porém observada em uma única jazida, a Mina do Cruzeiro. Essa mina é constituída por três corpos pegmatíticos, denominados de Veio 01, 02 e 03. Cada veio produz turmalinas com coloração distinta. No Veio 01 e 02, são explotadas rubelita, verdelita, tipo melancia, bicolor e a turmalina olho-de-gato, enquanto que no Veio 03, a indicolita e verdelita são produzidas.

Em função da grande variação de cor que esses minerais podem apresentar, é esperado que suas propriedades ópticas também variem. As propriedades ópticas para cada grupo de cor estão sumarizadas na Tabela 3.

O pleocroísmo está intimamente relacionado à composição química e, conseqüentemente, ao tipo de molécula. De um modo geral, o pleocroísmo é de intensidade variável, mas nas turmalinas ricas em ferro é geralmente muito forte. A absorção é sempre $\omega > \epsilon$, resultando uma absorção máxima quando o eixo c for perpendicular à direção de vibração do polarizador. Nas turmalinas de São José da Safira, observa-se que as turmalinas de cor preta mostram um pleocroísmo variável entre castanho amarelado até o verde amarelado; as de cores azuis e verdes apresentam um matiz mais pálido que a cor, e as avermelhadas são geralmente incolores, segundo a direção ϵ . Os índices de refração e a birrefringência mostram uma grande variação e também estão relacionados ao

Tabela 3 Propriedades ópticas das principais variedades gemológicas das turmalinas de Minas Gerais.

Cor	Araçuaí*			São José da Safira**				Conselheiro Pena***			
	Verde	Azul claro	Azul Marinho	Vermelha	Verde claro	Azul	Preta	Rosa	Verde	Verde grama	Azul
Caráter óptico	Uniaxial negativo			Uniaxial negativo				Uniaxial negativo			
n_{ω}	1,63 8- 1,64 0	1,640	1,660	1,630- 1,638	1,617- 1,638	1,616- 1,636	1,621- 1,640	1,640- 1,649	1,640- 1,642	1,640- 1,648	1,660
n_z	1,620 0- 1,630 0	1,620	1,640	1,612- 1,629	1,637- 1,640	1,635- 1,637	1,638- 1,642	1,618- 1,630	1,618- 1,620	1,620- 1,630	1,630
Δ	0,020 0	0,020	0,020	0,018- 0,026	0,020- 0,022	0,018- 0,022	0,018- 0,029	0,018- 0,022	0,022	0,010- 0,024	0,030

Fonte: *Casteñeda 1997; **César-Mendes 1995; ***Coelho 1999



conteúdo de ferro, ou seja, quanto maior for o teor de ferro maior será o índice de refração.

A *chatoyance* ou acatassolamento, um fenômeno de reflexão responsável pela formação de uma faixa luminosa estreita e brilhante que se move ao girar o cristal, é observada em algumas turmalinas desses distritos. Essa propriedade permite que as turmalinas sejam lapidadas na forma de cabochões, mostrando o efeito olho-de-gato.

A caracterização óptica dos minerais do grupo da turmalina também é feita por meio de absorção óptica. São identificadas três principais bandas de absorção no espectro visível, cujas ocorrências ou variações de intensidade existem em função da cor, de sua intensidade e da direção de polarização. Os espectros de absorção óptica mostram 4 bandas relacionadas ao ferro a 420, 470, 660 e 720nm nas espécies verdes e três, a 420, 470 e 720nm nas azuis. Nas rosas, três bandas dominantes centradas a 390, 520, 530 e 630nm foram detectadas e correlacionadas com as transições ópticas do manganês. Na Tabela 4 apresentam-se as principais bandas de absorção óptica obtidas em turmalinas do Distrito de Araçuaí. Nas Figuras 8, 9, 10, 11 e 12, encontram-se os espectros de absorção óptica.

Todos os espectros, com exceção das elbaítas rosas, mostram a banda de absorção com máximo em 720nm (Figura 8). Na literatura, as bandas de absorção centradas em 720nm e 1250nm, com polarização perpendicular a c, são atribuídas a transições do tipo ${}^5T_2 \rightarrow {}^5E$ do Fe^{2+} . Essa transição está relacionada à presença de Fe^{2+} nos sítios Y e Z e/ou suas interações e transferência de carga. Nos espectros apresentados, não foram registradas as bandas situadas fora do alcance do visível. Essa hipótese é corroborada por meio dos dados de espectroscopia Mössbauer das turmalinas de Araçuaí, que mostram contribuição de Fe^{2+} nos sítios Y e Z. Além das bandas devidas ao Fe^{2+} , duas outras, atribuídas a transições relacionadas ao Fe^{3+} em pares, são importantes a 520nm e 460nm.

Tabela 4

Bandas de absorção óptica nas Fe-elbaítas e elbaítas e suas principais características.

Cor	Posição (nm)	Características	Posição (nm)	Características	Posição (nm)	Características
Verde grama	720 (E⊥c)	Muito larga	470	MI a BI	410	BI
	660	AI				
Verde azulada	720	Muito larga	470	Muito fraca (E⊥c)	420	Ombro (E⊥c)
	660	MI				
Azul	720	Larga	470	Definida fina (E⊥c)	420	Definida fina (E⊥c)
Azul claro		MI				Muito fraca (E//c)
Rosa	630	Ombro	530	Larga BI (E⊥c)	390	Fraca (E⊥c)
			520	Larga BI (E//c)		Muito fraca (E//c)
Verde	720	Muito larga				
Rosa			520	Larga BI (E⊥c)		

AI = alta intensidade; MI = média intensidade; BI = baixa intensidade

As bandas a 410 e 470nm estão presentes principalmente nas turmalinas com tonalidades mais azuladas (Figura 9). Na maioria das Fe-elbaítas azuis, a origem dessas bandas deve-se à presença do ferro e suas transições. De acordo com trabalhos anteriores (Smith, 1978; Taran *et al.*, 1993, etc.), bandas de absorção centradas nessa região podem ser causadas pelos íons Mn^{2+} (~414 e 630nm)

Figura 8. Espectro de absorção óptica de uma Fe-elbaíta verde medido a temperatura ambiente. Observa-se as bandas centradas a 720, 660, 470 e 410nm.

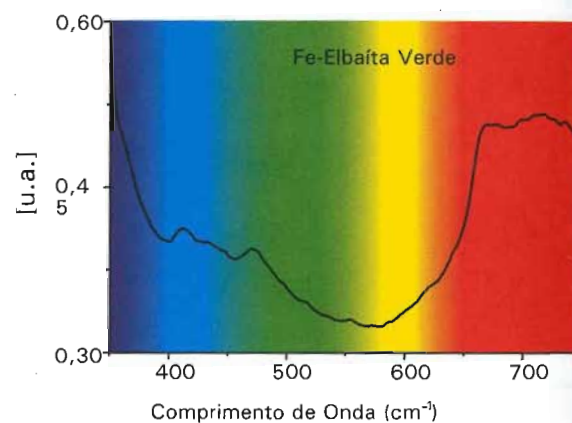
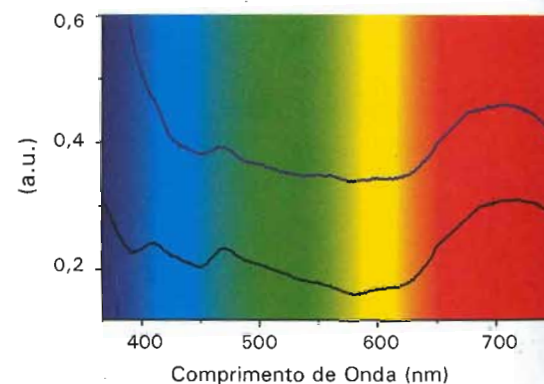
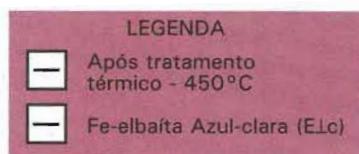


Figura 9. Espectro de absorção óptica de uma Fe-elbaíta azul, antes e após tratamento térmico, medido a temperatura ambiente. Observa-se as bandas centradas a 720, 470 e 410nm na primeira e o desaparecimento da 410nm concomitante com o clareamento após a queima.



e Mn^{3+} (520nm) e pelas transições do campo cristalino do tipo *spin-forbidden* causados pelo ferro (368, 378, 385 e 440nm). O Mn^{3+} é, geralmente, atribuído como causa da cor rosa, enquanto que o Mn^{2+} e o Fe^{2+} formam um par de interação associado às transições a 560nm, a qual pode estar associada com a causa da cor verde ou azul.

Figura 10. Espectro de absorção óptica de Elbaíta bicolor verde/rosa, medido a temperatura ambiente. Observa-se a diferença principal das bandas de absorção centradas a 720 e a 520nm, respectivamente.

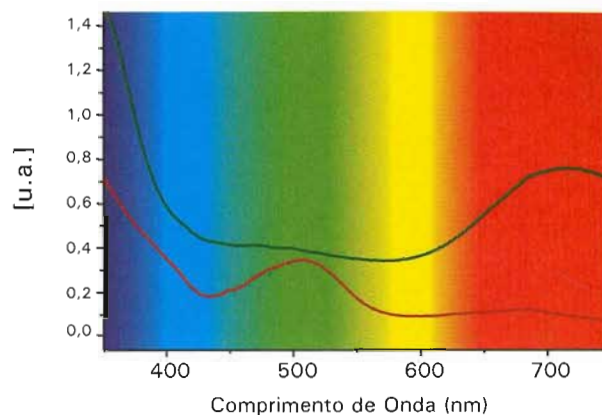
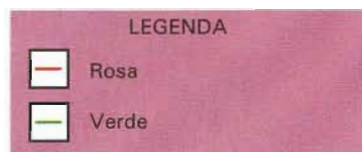


Figura 11. Espectro de absorção óptica de uma Elbaíta rosa pálida medido a temperatura ambiente. Observa-se a banda centrada a 520 e 390nm de baixa intensidade.

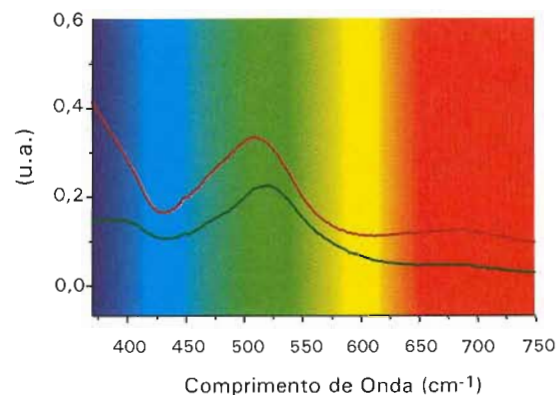
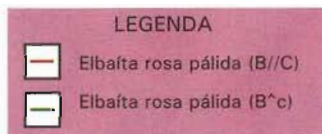
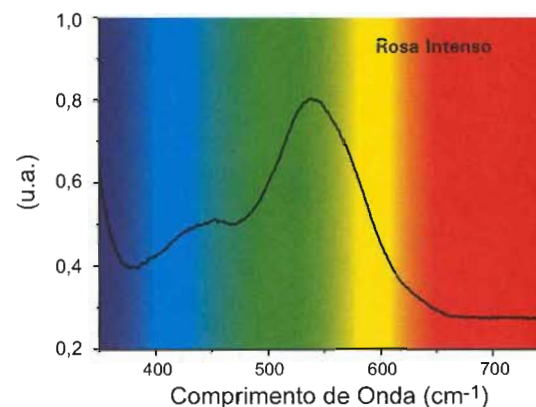


Figura 12. Espectro de absorção óptica de uma Elbaíta rosa forte medido a temperatura ambiente. Observa-se a banda centrada a 520nm e deslocamento da banda 390nm de alta intensidade.



Dois fatos descartam a possibilidade do Mn ser o principal causador das absorções ópticas nas turmalinas azuis. Primeiramente, Mn^{2+} não foi detectado no espectro EPR dessa variedade, apesar de apresentarem conteúdos significativos de Mn_{total} . Em segundo lugar, quando tratadas termicamente a $450^{\circ}C$, o azul descolore gradualmente e a banda 470nm apenas enfraquece, evidenciando que as absorções ópticas produtoras de cor não são devidas ao Mn (vide Figura 10). Pelo menos três hipóteses podem ser levadas em conta para explicar a absorção óptica das turmalinas azuis: i) a superposição de bandas ii) a presença de Mn^{4+} como um centro precursor da banda produtora da variação da cor e iii) a existência de, pelo menos, mais um centro de cor, provavelmente do tipo buraco. Na espécie com altas concentrações de ferro, a janela de transmissão das bandas de absorção desvia em direção ao verde, resultando nas espécies verdes sem



Foto 7. Jóia em ouro, com turmalina verde e diamante. Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).



matizes azuis. Nas verdes, as interações de ferro e manganês parecem ser a mais provável causa das bandas de absorção óptica.

Os espectros de absorção das elbaítas rosas confirmam os dados da literatura, apresentando duas bandas com máximo a 390 (B_{1c}) e 520nm (Mn²⁺ e Mn³⁺, Figuras 10,11 e 12). Nesse caso, o espectro EPR mostra claramente sinais de Mn²⁺, e o tratamento térmico a 450°C remove toda cor, sendo que as bandas de absorção desaparecem simultaneamente. Esses resultados indicam que a cor pode ser decorrente da presença de íons de Mn³⁺, estado de valência provavelmente gerado pela atuação de algum tipo de radiação. Outros centros de cor com mecanismos mais complexos e/ou a combinação de vários fenômenos para a causa da cor rosa podem estar presentes, além do Mn.

Geologia dos Depósitos de Turmalinas

As principais regiões produtoras de turmalinas gemológicas estão situadas nos Distritos Pegmatíticos de Araçuaí, São José da Safira e Conselheiro Pena, situados na porção Nordeste do Estado de Minas Gerais (vide Figura de Distritos do Capítulo 1). Essa região tem sido explorada desde meados do século XVIII, sendo tradicionalmente conhecida como um importante pólo de suprimento de minerais-gemas, minerais de lítio, berilo industrial, feldspato industrial, mica e cassiterita.

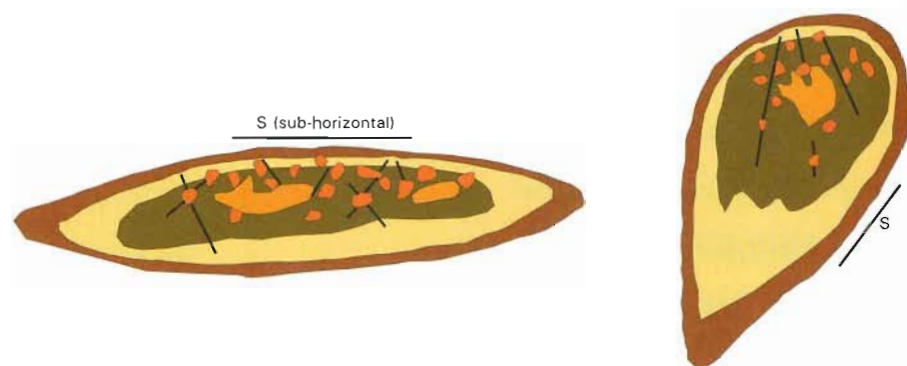
Esses distritos estão localizados no Cinturão Orogenético Neoproterozóico-Cambriano, resultado do ciclo Brasileiro-Pan-Africano, caracterizado pelo conjunto de orogêneses diacrônicas finalizadas em torno de 850 Ma a 550 Ma. As turmalinas encontram-se em pegmatitos graníticos intrudidos em seqüências metassedimentares desse cinturão. Esses pegmatitos são derivados de granitos do tipo-S, que, em escala regional, constituem intrusões tardi- a pós-tectônicas considerados como fusões anatéticas de rochas metassedimentares e cristalizados em níveis crustais intermediários (Pedrosa-Soares & Siga Jr 1987; Pedrosa-Soares *et al.* 1992b; Pinto & Pedrosa-Soares 2001). A grande maioria dos pegmatitos desses distritos foi gerada das fusões residuais dessas intrusões. Os pegmatitos mais férteis são corpos espessos intrudidos em seqüências de quartzitos e xistos. Os granitos e os pegmatitos associados tiveram sua origem em distintos episódios da granitogênese regional (Pedrosa-Soares *et al.* 1999), estando o distrito de Conselheiro Pena relacionado à granitogênese entre 585-570 Ma e o de Araçuaí e São José da Safira, entre 530-520 Ma (Capítulo 1; Pinto & Pedrosa-Soares 2001).

Os pegmatíticos produtores de turmalinas caracterizam-se por apresentarem formas tabulares, segundo fraturas regionais de direção NNE, NNW, ENE e ESSE, e segundo mergulhos altos assim como formas lenticulares, seguindo a direção e mergulho da xistosidade principal. Apresentam estrutura zonada complexa, caracterizada por maior complexidade estrutural e mineralógica, evidenciada, principalmente, pelos volumosos e freqüentes corpos de substituição. Atualmente, sabe-se que os padrões mais zonados são encontrados em intrusões altamente fracionadas com mineralizações complexas. No modelo clássico, encontram-se, com freqüência, dois padrões de estruturas zonadas: (a) padrão concêntrico de zonas primárias, com controle zonal de unidades tardias e das mineralizações marginais ao núcleo; (b) padrão concêntrico das zonas primárias, cortadas por preenchimento de fratura e com controle litológico das unidades metassomáticas (Cerny 1991). Recentemente, Pedrosa-Soares *et al.* (1997) propõem um novo modelo de padrão de estruturas zonadas que considera a influência da forma e da atitude dos corpos na morfologia da estrutura interna. O padrão denominado assimétrico-updip resulta da migração dos resíduos silicatados tardios e dos fluidos aquosos (fluidizadores da fusão e formadores de unidades tardias) para porções superiores dos corpos no decorrer da consolidação do pegmatito. Conseqüentemente, as unidades primárias internas tornam-se mais ou menos assimétricas no sentido contrário ao mergulho do corpo (efeito *updip*), assim como as unidades tardias concentram-se, preferencialmente, na porção superior dos corpos (Figura 13).

Na região do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, a turmalina é encontrada nas Minas e/ou Garimpos do Urubu, Limoeiro, Barra do Salinas, Ouro Fino, Morro Redondo e no Taquaral; em Conselheiro Pena, ela ocorre nas Minas do Jonas, Itatiaia e Formiga; e, em São José da Safira, nas Minas do Cruzeiro, Pederneira, Colônia, Benedito, Aricanga, Chiar, Safirinha e Marcelo.

As turmalinas encontradas nessas regiões exibem muitas variações de cor. Em diferentes zonas dos pegmatitos, podem ser encontrados cristais com uma gama de tonalidades que vão do preto ao incolor, apresentando quase todas as cores do espectro no visível.

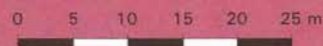
Figura 13. Modelo de estrutura interna assimétrica (em corte vertical) devido à atitude dos corpos. Em regra, quanto maior o mergulho, mais notável é a assimetria da distribuição de unidades internas. A e B, modelos idealizados, a turmalina-gema encontra-se nos corpos de substituições e caldeirões (Pedrosa-Soares *et al.* 1997).



LEGENDA

- Concentrações de corpos de substituições e caldeirões
- Núcleos, quartzo maciço + cristais de tamanhos diversos
- Zonas intermediárias, textura grossa a muito grossa (cristais gigantes)
- Zonas murais, textura fina a grossa geralmente gráfica
- Zonas marginais, textura fina a média
- Preenchimentos de fraturas

ESCALA



Lavra do Morro Redondo

Um dos principais corpos pegmatíticos do Distrito de Araçuaí situa-se no Morro Redondo, localizado a 17km a Nordeste de Virgem da Lapa. Essa lavra representa a mais importante descoberta de rubelita no Brasil, nos últimos dez anos. Após vários anos sendo explotada por meio de garimpo, hoje vem sendo pesquisada por um grupo norte-americano, visando determinar perfeitamente o corpo e as regiões mineralizadas. Em 1994, foi encontrado um caldeirão, medindo cerca de 15x15x10m, preenchido por cristais gigantes de quartzo hialino, alguns com mais de uma centena de quilos e denominado de caverna pelos garimpeiros.

A forma tabular desse corpo é definida pelo seu posicionamento ao longo de fraturas subverticais, nos quartzitos da Formação

Chapada Acauã. A estrutura interna do pegmatito é assimétrica e composta por quatro zonas primárias, cortadas por extensos preenchimento de fraturas e grandes unidades metassomáticas. As zonas externas são compostas por quartzo, albita, muscovita e granada de granulação fina. Cristais de schorlita preta e bicolor são encontrados na região com pouca muscovita. Esses cristais exibem crescimento unidirecional, observado pela mudança de cor, com uma base preta e topo verde, ou por inclusões de turmalina acicular, orientada segundo o eixo *c* do cristal. As zonas internas são compostas por feldspato perítico de granulação grossa, quartzo e aglomerações de mica clara. Grandes cristais de schorlita fraturados e, eventualmente, columbita-tantalita, berilo e cassiterita também são observados. Nos corpos de substituição, de tamanhos e formas variados, são encontrados amblygonita, lepidolita e albita, na forma de cleavelandita. Os preenchimentos de fraturas são compostos por cristais médios de turmalinas rosas e bicolores, numa matriz de albita e mica roxa de granulação muito fina. Há dois tipos de caldeirões imersos nos corpos de substituição: um de grande porte, preenchido por cristais de quartzo euédrico (*jacaré*, no jargão do garimpo), e outro de médio porte, com turmalinas coradas, berilo, quartzo e micas claras. O núcleo é constituído essencialmente por quartzo hialino, leitoso e *fumê*, apresenta-se descontínuo, mas seguindo o zonamento primário.

Lavra do Limoeiro

A Lavra do Limoeiro, localizada a 11 km a Noroeste da cidade de Virgem da Lapa, foi intensamente explotada durante a II Guerra Mundial para a retirada de berilo, mica e quartzo. Hoje é conhecida pelos excepcionais cristais de turmalinas verdes, herderita gemológica e os grandes cristais de topázio azul expostos nos maiores museus do mundo. Quando os trabalhos de garimpagem cessaram com a diminuição da demanda dos minerais industriais, essa mineração ficou abandonada durante duas décadas. A partir dos anos 70 do século XX, os trabalhos foram retomados visando à retirada de gemas.

Trata-se de um corpo aparentemente tabular, encaixado ao longo da xistosidade do xisto da Formação Salinas. Apresenta padrão concêntrico das zonas primárias cortadas por preenchimentos de fraturas e controle litológico dos corpos de substituição. As zonas primárias são constituídas por feldspatos, quartzo, muscovita, biotita, schorlita, berilo e granada. Nas zonas mais internas, encontram-se os corpos de substituição, de formas e tamanhos variados e, pequenos preenchimentos de fraturas que começam no núcleo e atingem as zonas mais externas. Neles há presença de várias gemas, tanto para lapidação como para amostras de coleção. Os corpos de substituição são facilmente reconhecíveis, principalmente quando se observa o crescimento de cleavelandita nos planos de clivagem da microclina de aspecto esponjoso. A presença de albita sacaroidal, muscovita em finas palhetas e turmalinas pretas são diagnósticos da proximidade de corpos de substituição. No jargão próprio, essas associações minerais são chamadas de *refervido*. Os caldeirões têm sua porção interna recoberta por quartzo leitoso, cleavelandita, micas rosas, turmalinas coradas, topázio azul, berilo e alguns minerais raros, como herderita, microlita e apatita. Pequenos preenchimentos de fraturas acompanham, em posição e mineralogia, os caldeirões. O núcleo, composto por quartzo leitoso, quase sempre é descontínuo.

Lavra do Cruzeiro

A Mina do Cruzeiro está situada a 13km de São José da Safira e inserida no Distrito Pegmatítico São José da Safira. É a principal produtora de gemas desse distrito, principalmente por suas rubelitas cor *sangue-de-pombo*, verdelitas, indicolita ou indigolita e turmalinas olho-de-gato, melancias, bicolores e multicolores. A lavra é composta por três corpos pegmatíticos aproximadamente paralelos, denominados de Veios 01, 02 e 03, principalmente em função de suas espessuras decrescentes, quando se caminha no sentido Leste para Oeste. O Veio 01 tem cerca de 60m de comprimento por até 60m largura, o Veio 02 apresenta 900m de comprimento por cerca de 20m de largura e o Veio 03, um comprimento de 700m e uma largura máxima de 8m. Os pegmatitos posicionam-se ao longo de planos tabulares, discordantes das estruturas dos quartzitos, com direção N20-30W e mergulho de 80-86SW. Sua mineralogia compreende micas (muscovita, lepidolita e polyolithionita), turmalinas (schorlita e elbaíta), nióbio-tantalatos, espodumênio, amblygonita, feldspatos, quartzo, berilo, cassiterita, granada, apatita e outras raridades mineralógicas.



Foto 8. Garimpeiro seguindo a linha mineralizada em
tormalinas na galeria do Pegmatito do Cruzeiro,
São José da Safira, Minas Gerais.
(Foto: Antonio Liccardo).

Os corpos pegmatíticos apresentam um zonamento com padrão concêntrico das zonas primárias, às vezes cortadas por preenchimento de fratura e unidades metassomáticas tardias, compostas por caldeirões e corpos de substituições, denominados de massa pelos garimpeiros. Nessas unidades tardias, são retiradas as tormalinas gemológicas. Cada veio pegmatítico produz tormalina com coloração distinta; no Veio 01 e 02, há predominância de rubelita, verdelita e olho-de-gato, enquanto no Veio 03, as indicolitas e verdelitas.



Foto 9. Rubelita proveniente do veio 01 da Mina do Cruzeiro,
São José da Safira, Minas Gerais.
(Foto: Antonio Liccardo).

Lavra do Fiote

A lavra do Fiote está localizado a 5km a Sul de Conselheiro Pena e pertence ao Distrito Pegmatítico homônimo. Foi descoberta, por acaso, por um garimpeiro chamado Barbosa, em 1930, que encontrou as turmalinas policromáticas sob o solo de alteração, por ele denominadas de *papagaio*. Até 1978, era conhecida como Lavra do João Pinto, quando passou a se chamar Lavra do Jonas, em homenagem ao seu proprietário e descobridor das mais importantes rubelitas de toda a história da mineração de gema no Brasil. Essas rubelitas foram encontradas em um único caldeirão de forma oval, de medidas aproximadas 3x3x3m, preenchido também por quartzo, lepidolita e albita. Entre os principais espécimes produzidos nesse período, destacaram-se quatro cristais denominados Joanhinha (325kg), Tarugo (80kg), Flor-de-Liz (32kg) e Foguete (35kg). Hoje é conhecida como lavra do Fiote, pois localiza-se na propriedade de Alfredo Alfiano Vasconcelos, conhecido na região como Sr. Fiote.

O pegmatito, aparentemente tabular, está encaixado segundo a xistosidade dos xistos da Formação São Tomé. Apresenta estrutura zonada complexa, com zonas externas ricas em schorlita preta, denominada pelos garimpeiros locais de *cativo*, e zonas internas ricas em turmalinas coradas. A composição mineralógica principal é quartzo, microclina, muscovita e albita lamelar, enquanto turmalinas, berilo, granada e fluorita constituem a mineralogia acessória. Todas as espécimes gemológicas e coleção foram retirados em caldeirões localizados nas zonas mais internas do corpo.

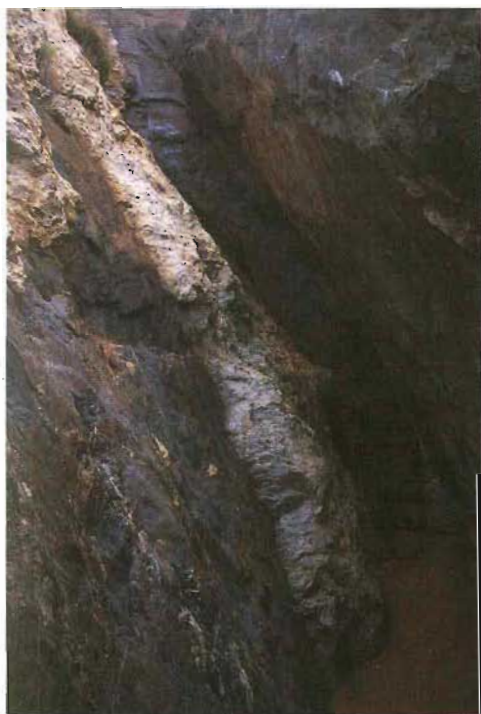


Foto 10. Vista da Lavra do Jonas, distrito pegmatítico de Conselheiro Pena, Minas Gerais.
(Foto: Antonio Liccardo).

Bibliografia Consultada

- Afonina, G.G. & Makagon, V.M. 1992. *Unit cell parameters of tourmaline modifications at different degree of ordering. Russian Geology and Geophysics*, 33(7): 53-57.
- AGTA 1993, 1997. *The Gemstone Enhancement Manual*. 2-4 ed. Dallas, Texas, USA, American Gem Trade Association.
- Barton, R. 1969. *Refinement of the crystal structure of buergerite and the absolute orientation of tourmalines. Acta Crystallogr.*, B (25): 1524-1533.
- Bershov, L.V.; Martirosyan, V.O.; Marfunin, A.S.; Plantanov, A.N.; Tarasschan, A.N. 1969. *Color centers in lithium tourmaline (elbaite). Soviet Physics Crystallography*, 13:629-630.
- Bilal, E.; César-Mendes, J.; Correia Neves, J. M.; Giret, A. 1997. *Chemistry of some pegmatites of São José da Safira area, Minas Gerais, Brazil. Romanian Journal of Mineralogy*, 78(1): 4-6.
- Bilal, E.; César-Mendes, J.; Correia Neves, J. M.; Nasraoui, M.; Fuzikawa, K. 1998. *Chemistry of tourmaline in some pegmatites of São José da Safira area, Minas Gerais, Brazil. Tourmaline - Journal of the Czech Geological Society*, 43(1-2): 33-38.
- Branco, P. M. 1984. *Glossário gemológico*. Editora Universitária, Porto Alegre, Brasil. 203p.
- Bravais, A. 1851. *Études cristallographiques. Journal de l'École Polytechnique*, 20: 101 - 276
- Burns, R.G.; Simon, H.F. 1973. *Cation disorder in tourmalines. Geochemical Society of America Abstract with Programs*, 5: 563-564.
- Burns, P.C.; Mac Donald, D.J.; Hawthorne, F. 1994. *The Crystal Chemistry of Manganese - Bearing Elbaite. Canadian Mineralogist*, 32: 31-41.
- Burns, R.G. 1982. *The Blackness of Schorl: Fe²⁺/Fe³⁺ Electron delocalization in tourmaline. Trans. Am. Geophys. Union*, 64:1142.
- Burt, D.M. 1989. *Vector Representation of Tourmaline Compositions. American Mineralogist*, 74: 826-839.
- Castañeda, C. 1997. *Caracterização Mineralógica das Turmalinas do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG. Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado*, 149p.
- Castañeda, C.; Pedrosa-Soares, A.C.; Gomes, N.S. 1996. *Mineralogical and Geochemical Variations in Tourmalines as Indicators of Pegmatite Evolution in the Araçuaí District, Minas Gerais, Brazil. In: Reunión de Mineralogía y Metalogénia*, 3. La Plata, 1996. Anais... La Plata, 5: 79-86.
- Castañeda, C.; Oliveira, E.F.; Pedrosa-Soares, A.C. And Gomes, N.S. 2000. *Infrared study of O-H sites in tourmalines from the elbaite-schorl serie. American Mineralogist* 85(10), 1503-1507.
- Castañeda, C.; Krambrock, K.; Pinheiro, M.V.B.; Satori Jr., H.; Botelho, N.F.; Pedrosa-Soares, A.C. 2000. *The Color of Natural and Treated Elbaite - Schorl Tourmalines from Brazil. In: International Congress of Geology*, 31.Rio de Janeiro, 2000 Anais...Rio de Janeiro, SBG
- Cerny, P. 1991. *Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatites deposits. Geoscience Canada*, 18: 49-67.
- César-Mendes, J. 1995. *Mineralogia e gênese dos pegmatitos turmalíferos da Mina do Cruzeiro, São José da Safira, Minas Gerais. Tese de Mestrado Universidade de São Paulo*, 260p.
- César-Mendes, J.; Bilal, E.; Correia Neves, J. M.; Fuzikawa, K.; Nasraoui, A. 1998. *The pegmatites of São José da Safira área, Minas Gerais, Brazil. In: CONG. BRAS. GEOL., 40. Belo Horizonte*, 1998. Bol. Res. Expand., Belo Horizonte, SBG., v. 1, p. 298.
- César-Mendes, J.; Bilal, E.; Correia-Neves, J. M.; Giret, A. 1994. *As turmalinas de pegmatitos da região de São José da Safira, Estado de Minas Gerais. In: CONG. BRAS. GEOL., 38, 1994, Balneário Camboriú. Bol. Res. Expand.... Balneário Camboriú, SBG, v. 1, p. 204-205.*
- César-Mendes, J.; Correia-Neves, J. M.; Fuzikawa, K.; Gandini, A. L. 1997. *Cromóforos nas turmalinas do Pegmatito da Pederneira, Santa Maria do Suaçuí, Estado de Minas Gerais, Brasil. In: Congr. Geol. dos Países de Língua Portuguesa, IV, Braga, Portugal. Memórias...*, 1: 171-174.
- César-Mendes, J.; Correia Neves, J. M.; Svisero, D. P. 1995. *Evolução geoquímica e elementos causadores de cores nas turmalinas da Mina do Cruzeiro, São José da Safira, Estado de Minas Gerais, Brasil. In: SBGq, Cong. Bras. Geoq., Niterói. Anais*.
- Chaudhry, M.N. & Howie, R.A. 1976. *Lithium Tourmalines from The Meldon Aplite Devonshire, England. Mineralogical Magazine*, 40: 747-751.
- Coelho, S. R. C. 1999. *Turmalinas dos pegmatitos Itatiaia e Fiotte (Jonas), Município de Conselheiro Pena, Estado de Minas Gerais. Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado*, 166p.
- Da Costa, G.M.; Castañeda, C.; Gomes, N. S.; Pedrosa-Soares, A.C.; Santana, C.M. 1997. *On the analysis of the Mössbauer spectra of tourmalines. Hyperfine Interactions*, C2:29-34
- Da Costa, G.M.; Castañeda, C.; Eckhout, S.G.; De Grave, E.; Gomes, N.S. 1998. *The Temperature dependence of the hyperfine parameters of Tourmalines. Hyperfines Interactions*, 3C: 344-347.
- De Camargo, M.B. & Isotani, S. 1988. *Optical absorption spectroscopy of natural and irradiated pink tourmaline. American Mineralogist*, 73:172-180
- Deer, O A, Howie, R.A, Zussman, J. 1963. *Rock Forming Minerals. Ortho and ring silicates. 1 ed. London, Rongman*, 333p.
- Dietrich, R.V. 1985. *The Tourmaline Group. 1 ed. New York, Van Nostrand Reinhol.*, 300p.
- Donnay, G. & Barton, R. 1972. *Refinement of The Crystal Structure of Elbaite and The Mechanism of Tourmaline Solid Solution. Tmpm Tschermaks Min. Petr. Mitt*, 18: 273-286.
- Dunn, P.J.; Appleman, D.E.; Nelen, J.E. 1977. *Liddicoatite, a new Calcium end-member of the tourmaline group. American Mineralogist*, 62: 1121-1124
- Dunn, P.J.; Arem, J.E.; Saul, J. 1975. *Red dravite from Kenya. Journal of Gemmology*, 14: 386-387



- Dunn, P.J. 1975. *On gem elbaite from Newry, Maine, USA*. *Journal of Gemmology*, 14(5): 357-368.
- Epprecht, W. 1953. *Die tter Konstanten der Tourmalin Schweiz*. *Min. Petr. Mitt.*, 33: 481-505.
- Faye, G.H.; Manning, P.G.; Gosselin, J.R. 1974. *The Optical Absorption Spectra of Tourmaline: Importance of Charge-transfer Processes*. *Canadian Mineralogist*, 12: 370-380.
- Federico, M.; Andreozzi, G. B.; Lucchesi, S.; Graziani, G.; César-Mendes, J. 1998 *Composition variation of tourmaline in the granitic pegmatite dykes of the Cruzeiro Mine, Minas Gerais, Brazil*. *The Canadian Mineralogist*, 36: 415-431.
- Foit JR., F.F. 1989. *Crystal Chemistry of Alkali - Deficient Schorl and Tourmaline Structural Relationships*. *American Mineralogist*, 74: 422-431.
- Foit Jr., F.F. & Rosenberg, P.E. 1977. *Coupled Substitutions in The Tourmaline Group*. *Contrib. Mineral Petrol.*, 62: 109-127.
- Grice, J.D. & Ercit, T.S. 1993. *Ordering of Fe and Mg in the tourmaline crystal structure: The correct formula*. *N. Jb. Miner Abh.*, 165(3): 245-266.
- Grice, J.D.; Robinson, G.M. 1989. *Ferruvita, a new member of the tourmaline group, and its structure*. *Canadian Mineralogist*, 27:199-203
- Hänni, H.A.; Frank, E.; Bosshart, G. 1981. *Golden yellow tourmaline of gem quality from Kenya*. *Journal of Gemmology*, 17: 437-442.
- Hawthorne, F. C. & Henry, D. J. 1997. *Classification of the minerals of the tourmaline group*. *European Journal of Mineralogist*, 11: 201-215.
- Henn, U.; Bank, H.; Bank, F.H. 1990. *Transparent bright blue Cu-bearing tourmaline from Paralba, Brazil*. *Mineralogical Magazine*, 54: 553-557
- Henry, N.F. & Lonsdale, K. 1952. *International Tables for X-ray Crystallography*. Birmingham, The Kynoch Press., v. 1, 558p.
- Hermon, E.; Simkin, D.J.; Donnay, G.; Muir, W.B. 1973. *The distribution of Fe(2+) and Fe(3+) in iron-bearing tourmalines: A Mössbauer Study*. *Tcher. Min. Priiri. Mitt.*, 17: 124-132.
- Leckebusch, R. 1978. *Chemical composition and colour of tourmalines from Darre Pech (Nuristan, Afghanistan)*. *N. Jb. Miner. Abh.*, 133(1): 53-70.
- Lucchesi, S.; Federico, M.; Graziani, G. Andreozzi, G.; César-Mendes, J. 1993. *Cristallochimica delle tormaline della pegmatite del Cruzeiro, Minas Gerais, Brasile*. *European Journal of Mineralogy*, 10: 171-173.
- Manning, P.G. 1969. *Optical absorption spectra of chromium bearing tourmalines, black tourmaline and buergerite*. *Canadian Mineralogist*, 10:57-70.
- Manning, P.G. 1973. *Effect of second-nearest-neighbor interaction on Mn³⁺ absorption in pink and black tourmalines*. *Canadian Mineralogist*, 11:971-977.
- Mattson, S.M. & Rossman, G.R. 1984. *Ferric iron in tourmalines*. *Physics and Chemistry of Minerals*, 11: 225-234.
- Mattson, S.M. & Rossman, G.R. 1987. *Fe²⁺ Fe³⁺ Interactions in Tourmalines*. *Physics and Chemistry of Minerals*, 14:163-171.
- Morosin, B. 1972. *Structure and thermal expansion of beryl*. *Acta Crystallography*, B28: 1899-1903.
- Nassau, K. 1975. *Gamma Ray Irradiation Induced Changes in the Color of Tourmalines*. *American Mineralogist*, 60:710-713.
- Nassau, K. 1984. *Gemstone Enhancement*. 1 ed. Londres, Butterworths. 221p.
- Nassau, K. 1994. *Gemstone Enhancement: history, science and state of the art*. 2 ed. Londres, Butterworths-Heinemann Ltd. 252p.
- Nuber, B. & Schmetzer, K. 1984. *Intensive yellow tselarsite (manganese tourmaline) of gem quality from Zambia*. *Journal of Gemology*, 19:218-223.
- Oliveira E. F.; Castañeda C.; Menezes; M. G. And Ribeiro, R. K. 2000. *Infrared study of Brazilian tourmalines from different geological environments*. In: *SBG, Int. Cong. of Geology*, 21 Rio de Janeiro, 2000 Anais.
- Pedrosa-Soares, A.C.; Monteiro, R.L.B.P.; Correia-Neves, J.M.; Leonardos Jr., O.H. 1990. *Tipologia dos Pegmatitos de Coronel Murta - Virgem da Lapa, Médio Jequitinhonha, Minas Gerais*. *Revista Escola de Minas*, 43(4): 44-59.
- Pedrosa-Soares, A. C.; Noce, C. M.; Vi Dal, P.H.; Monteiro, R. L. B. P.; Leonardos Jr., O. H. 1992. *Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) - West Congolian (SW Africa) Belt*. *Journal of South American Earth Sciences*, 6(1/2): 33-47.
- Pedrosa-Soares, A.C.; Romeiro, C.P.; Castañeda, C. 1997. *Papel do controle estrutural de pegmatitos graníticos em suas mineralizações: uma abordagem preliminar*. In *Simp. Nac. de Est. Tectônicos*, 6o, Pirenópolis, Go. Anais, 327-329.
- Pedrosa-Soares, A. C. & Viedemann-Leonardos, C. 2000. *Evolution of the Araçuaí belt and its connection to the Ribeira belt, eastern Brazil*. *Tectonic Evolution of South America*, 265-285.
- Petrov, I. 1990. *Role of natural radiation in tourmaline coloration: Discussion*. *American Mineralogist*, 75: 237-239.
- Pinto, C. P. & Pedrosa-Soares, A. C. 2001. *Brazilian gems provinces*. *Australian Gemmologist*, 21: 12-16.
- Povondra, P. 1981. *The Crystal Chemistry of tourmalines of the schor-dravite series*. *Acta Universitatis Carolinae - Geologica*, n(3): 223-264.
- Reinitz, I.M. & Rossman, G.R. 1988. *Role of natural radiation in tourmaline coloration*. *American Mineralogist*, 73: 822-825.
- Romeiro, J.P.C.; Pedrosa-Soares, A.C.; Quéméneur, J.J.G.; Marques, G.C.L. 1997. *Controle estrutural dos Pegmatitos da Mina da Cachoeira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG*. In: *Simp. Nac. de Est. Tectônicos*, 6o, Pirenópolis, Anais...
- Rosenberg, P.E. & Foit, F.F. 1979. *Synthesis and characterization of alkali-free tourmaline*. *American Mineralogist*, 64: 180-186.
- Rossman, G.R. & Mattson, S.M. 1986. *Yellow, Mn-rich elbaite with Mn-Ti intervalence charge transfer*. *American Mineralogist*, 71 (3/4): 599-602.
- Seagusa, N.; Price, D.C.; Smith, G. 1978. *Analysis of the Mössbauer spectra of several iron-rich tourmalines*. In: *ICAME, International Conference on the Application of the Mössbauer effect*. Kyoto, Japan. 1: 38-42.
- Smith, G., 1978. *A reassessment of the role of iron in the 5000-30.000 cm⁻¹ region of the electronic absorption spectra of tourmaline*. *Physics and Chemistry of Minerals*, 3: 343-373.
- Taran, M.N.; Lebedev, As.; Platanov, N.A. 1993. *Optical Absorption Spectroscopy of Synthetic Tourmalines*. *Physics and Chemistry of Minerals*, 20: 209-220.
- Twonsted, M.G. 1970. *On the dichroism of tourmaline*. *Journal Physics and Chemistry of Solids*, 31: 2481-2488.
- Wilkins, R.W.T.; Farrell, E.F.; Naiman, C.S. 1969. *The Crystal field spectra and dichroism of tourmaline*. *Journal Physics and Chemistry of Solids*, 30: 43-56.

capítulo oito

Topázio

Júlio César - Mendes

Antonio Liccardo

João E. Addad

Antonio Luciano Gandini

I n t r o d u ç ã o

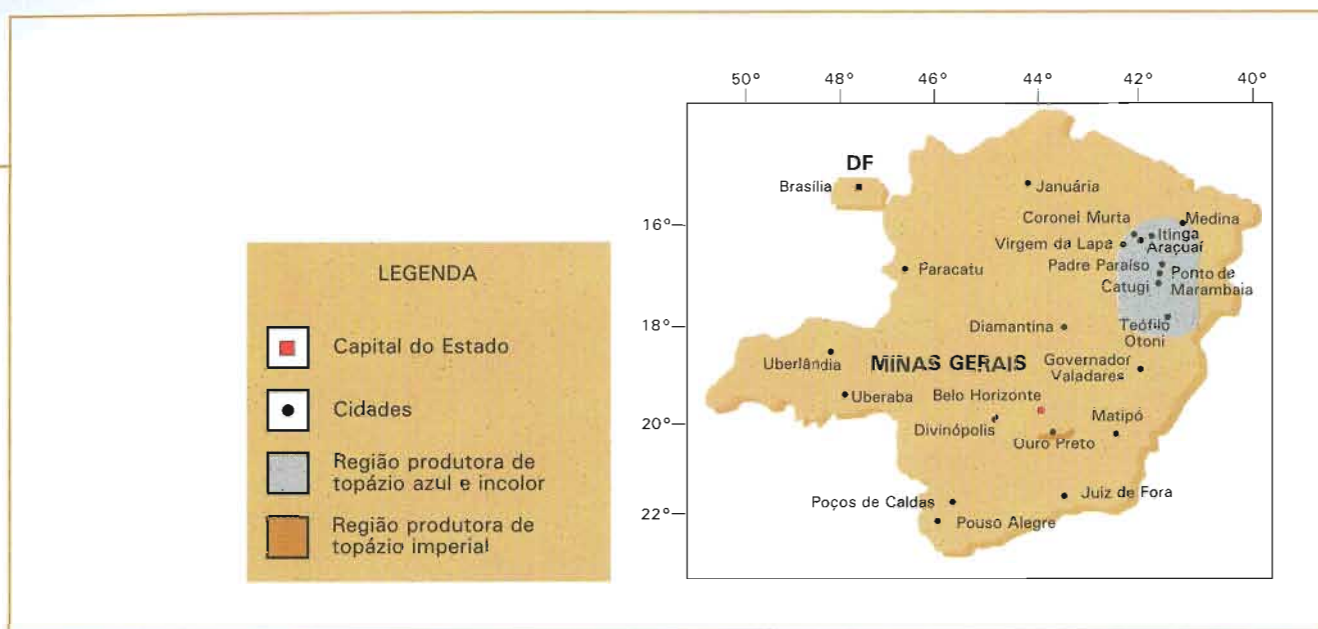
A palavra topázio se referia, desde os tempos mais remotos, a minerais de coloração amarelada. Sua origem é muito controvertida, alguns estudiosos sugerem que o nome deriva do grego, *topazion*; outros, do sânscrito, *tapas*, e, ainda, do latim, *topaziu*. *Topazion* significa procura e refere-se a uma ilha do Mar Vermelho, freqüentemente coberta por neblina, enquanto *tapas* e *topaziu* significam fogo (Webster 1980). Até hoje, a denominação topázio provoca equívocos no comércio, como as terminologias topázio bahia e topázio rio grande, que se referem a variedades de quartzo.

O topázio, nas cores incolor, azulado, amarelado e castanho é um mineral relativamente comum, principalmente nos ambientes pegmatíticos e secundários a eles associados. Além do Brasil, podem ser citados o Sri Lanka, Myanmar (Birmânia), Rússia, Nigéria, Namíbia, Índia e outros, como seus produtores. No Brasil, o topázio ocorre em vários estados, como Minas Gerais, Bahia, Ceará e Espírito Santo, normalmente associado a pegmatitos. Na Amazônia, o topázio incolor e azulado é um mineral comum nos *greisens* e aluviões, produtores de cassiterita. Em Minas Gerais, duas regiões despontam como principais produtoras de topázio a de Ouro Preto, com o topázio imperial, e a de Padre Paraíso, com o topázio incolor e azulado (Figura 1).

Entre as cores do topázio, a mais apreciada é a do topázio imperial, de tonalidades variando de amarelo a vermelho *conhaque*. No mundo, as ocorrências de topázio imperial encontram-se no Brasil, na Rússia, cujas jazidas estão praticamente exauridas, e no Paquistão. No Brasil, o topázio imperial ocorre somente na região de Ouro Preto, em Minas Gerais. A grande diferença entre as jazidas de Minas Gerais em relação às outras ocorrências deve-se ao fato de que, além de espécimes com qualidade gemológica excepcional, o topázio imperial ocorre em rochas altamente intemperizadas, o que facilita a sua extração e aumenta a rentabilidade do empreendimento (Gandini, 1986).

O topázio imperial foi descoberto por volta de 1772, no Morro de Saramenha, em Ouro Preto. Por causa dessa descoberta, o governador da Capitania de Minas Gerais convocou uma junta para propor que o quinto fosse pago com ouro ou topázio. Tal decisão não obteve êxito, pois, em lavra de gemas em geral, mesmo aquelas mais valiosas como a do diamante, o imposto máximo era limitado a 1%. Tal fato fez com que os representantes portugueses liberassem a extração de topázio imperial, isentando-a de impostos.

Figura 1. Regiões produtoras de topázio em Minas Gerais.



Provavelmente, a primeira citação encontrada na literatura deve-se a John Mawe, em 1812, que, em sua viagem por Minas Gerais, identificou os corpos mineralizados como oriundos da alteração de veios micáceos. Os naturalistas Spix e Martius, em 1831, fizeram o mesmo tipo de referência, mencionando as jazidas da Fazenda do Lana e do Capão do Lana. O primeiro trabalho geológico foi de Eschwege, em 1833, que considerou a mineralização como encaixada em talco xisto e condicionada a dois alinhamentos principais.

Atualmente, além de alguns garimpos, as minerações do Vermelhão, em Saramenha e do Capão do Lana, na localidade de Rodrigo Silva, são responsáveis pela maior parte do topázio imperial produzido no mundo.

Propriedades Físicas, Químicas e Cristalográficas

O topázio é um nesossilicato de fórmula $Al_2(SiO_4)(F, OH)_2$, com solução sólida incompleta entre o flúor e a hidroxila (Webster 1980). A cela unitária é caracterizada pelos parâmetros $a_0 = 4,65\text{\AA}$; $b_0 = 8,80\text{\AA}$ e $c_0 = 8,39\text{\AA}$, sendo $Z = 4$ (Deer *et al.* 1982). Sua estrutura cristalina, relativamente densa, é uma combinação entre um empacotamento fechado do tipo hexagonal e cúbico dos átomos de oxigênio e de flúor, sendo seus raios iônicos aproximadamente iguais. Essa estrutura é constituída por um arranjo independente de grupos SiO_4 tetraédricos, com uma relação Si:O de 1:4, ligados a íons de alumínio (Al^{3+}) intersticiais em sítios octaédricos (AlO_4F_2), numa cadeia paralela ao eixo c (Figura 2).

Quatro dos seis ânions que rodeiam cada alumínio são oxigênios pertencentes aos grupos SiO_4 , e os outros dois são flúor e/ou hidroxila que estão presentes em proporções variáveis, tornando a simetria local do íon alumínio consideravelmente menor que a octaédrica. Essa disposição dos átomos confere ao mineral um hábito prismático observado comumente em cristais bem formados do mineral. A clivagem basal perfeita $\{001\}$ é advinda da quebra das ligações Al-O e Al-F em igual número e nunca pela ligação Si-O. Nos nesossilicatos, não ocorre a substituição de Al^{3+} por Si^{4+} .

Figura 2. Estrutura cristalina do topázio (Rager *et al.* 2000).

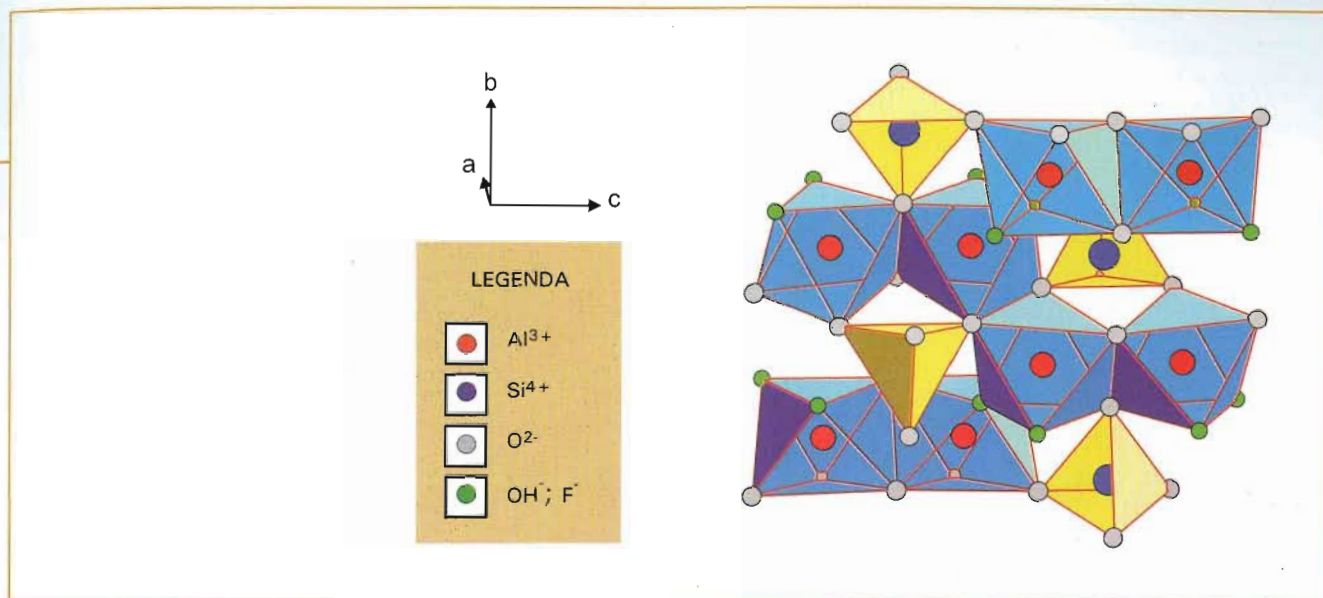


Foto 1. Cristais prismáticos de topázio imperial, um isolado e outro na matriz de canga. Coleção do Museu de Ciência e Técnica da Escola de Minas de Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

Sua composição química é razoavelmente constante, destacando-se a variação da relação de íons fluoreto e hidroxila. Para o flúor, o teor máximo descrito foi de 20,7%, enquanto que, para a hidroxila, o maior valor encontrado foi 2,18% (Deer *et al.* 1982). Os cristais de topázio podem apresentar em sua estrutura uma grande quantidade de elementos traços, como a Ag, As, Ca, Ba, Be, Cr, Fe, V, Mn, Na e muitos outros. A substituição parcial do Al por Cr, aparentemente, produz a coloração amarelada do topázio imperial.

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades cristalográficas e ópticas do topázio.

Comumente, as dimensões do topázio variam desde milímetros a alguns centímetros. Entre os grandes cristais já encontrados, Cassedanne (1989) cita um espécime de topázio imperial pesando 504g, talvez o maior cristal encontrado até hoje na região de Ouro Preto. Quanto ao topázio de origem pegmatítica, nas regiões de Araçuaí e Padre Paraíso, encontram-se megacristais, alguns pesando vários quilos, utilizados como gema ou como espécimes de coleção apreciados pelos museus de todo o mundo.

Várias propriedades físicas do topázio estão relacionadas com a razão F/OH. Quanto maior o valor de flúor, maiores a densidade e o ângulo 2V e menores os índices de refração e o parâmetro b_0 . O topázio imperial da região de Ouro Preto, normalmente, apresenta um teor mais elevado de OH do que F, enquanto os de outros locais são mais ricos em flúor.

Tabela 1 Resumo das principais propriedades cristalográficas e ópticas do topázio (Klein & Hurlbut 1985).

Dados cristalográficos	Sistema ortorrômbico, classe mmm, grupo espacial Phnm.
Dimensões da cela unitária (Å)	$a_0 = 4,64$; $b_0 = 8,80$; $c_0 = 8,40$
Hábito	Prismas com terminações multifacetadas, com estriações ao longo do eixo c. Agregados colunares ou fibrosos.
Cor	Incolor, azul claro a intenso, verde claro, amarelo claro a acastanhado e rosa.
Brilho	Vítreo e nacarado nos planos de clivagem.
Clivagem	Pinacoidal basal perfeita {001}
Dureza relativa	8,0 (Mohs)
Densidade relativa	3,4 a 3,6
Sinal óptico	Biaxial positivo
Índices de refração	$n_X = 1,606 - 1,629$; $n_Y = 1,609 - 1,631$; $n_Z = 1,616 - 1,638$
Ângulo 2V	48 a 68°
Pleocroísmo	Amarelo (distinto) - amarelo limão, mel e palha Vermelho (intenso) - vermelho escuro e rosado, amarelo Rosa (distinto) - incolor, rosa fraco e rosa Verde - verde claro e azulado, branco esverdeado Azul claro - azul claro, rosa e incolor.



Foto 2. Cristais euédricos de topázio imperial, um dos quais em uma jóia em ouro, provenientes de Rodrigo Silva (Ouro Preto - MG), Itagemas, Ouro Preto. (Foto: Antonio Liccardo).

Topázio Imperial

O Estado de Minas Gerais é, atualmente, o maior produtor de topázio imperial com qualidade gemológica do mundo. Apesar de as ocorrências serem conhecidas desde o século XVIII, somente a partir da década de 70 do século XX, teve início uma extração sistemática. A Mina de Saramenha ficou esquecida até 1971, quando foi reencontrada por acaso, durante os trabalhos de terraplenagem para construção. O tratorista retirava um barranco e observou o aparecimento de um grande número de cristais de topázio. A partir daí, essa mina vem sendo trabalhada ininterruptamente pela Mineração Vermelho.

Outra mineração é a do Capão do Lana, em Rodrigo Silva, que foi redescoberta, no final da década de 70, a partir de documentos históricos e pesquisa geológica. Atualmente, a lavra é mecanizada e apresenta produção grande e regular.

Essas duas minerações são responsáveis pela quase totalidade da produção na região de Ouro Preto. Em outros locais, há pontos com atividade garimpeira. Podem ser citados como mais importantes, os garimpos de Antônio Pereira, Caxambu, Dom Bosco, Boa Vista, Antônio Nery, Barraginha e Trino. Em boa parte desses locais, a extração é feita em depósitos secundários, principalmente em aluvião.

Geologia do Topázio Imperial

As várias ocorrências e/ou jazidas de topázio imperial na região de Ouro Preto localizam-se no Quadrilátero Ferrífero, em rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, numa região clássica pela exploração de outros bens minerais como ouro, ferro e manganês. Todas as jazidas e/ou ocorrências estão localizadas numa região relativamente restrita, com uma superfície de aproximadamente 200km² (Gandini 1994) (Figura 3).

Após Eschwege, em 1833, que determinou a mineralização como encaixada em talco xisto e condicionada a alinhamentos, uma interpretação mais detalhada foi feita por Gorceix, em 1881, que descreveu o topázio encaixado em rocha composta por caulinita, moscovita e quartzo, além de pequenas concentrações de manganês, sempre ocorrendo ao longo de falhamentos e em veios irregulares com 2 a 3m de espessura.

Figura 3. Esboço geológico do Quadrilátero Ferrífero, onde pode ser observada a área de ocorrência de topázio imperial (César-Mendes & Gandini 2000, modificado de Dorr II 1969).

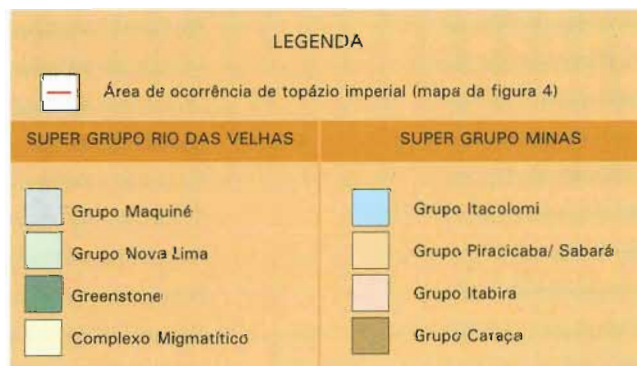
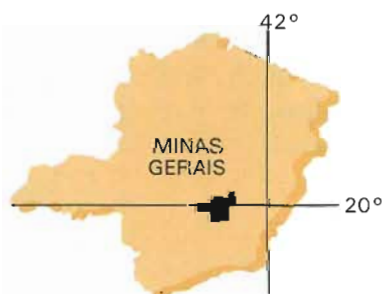
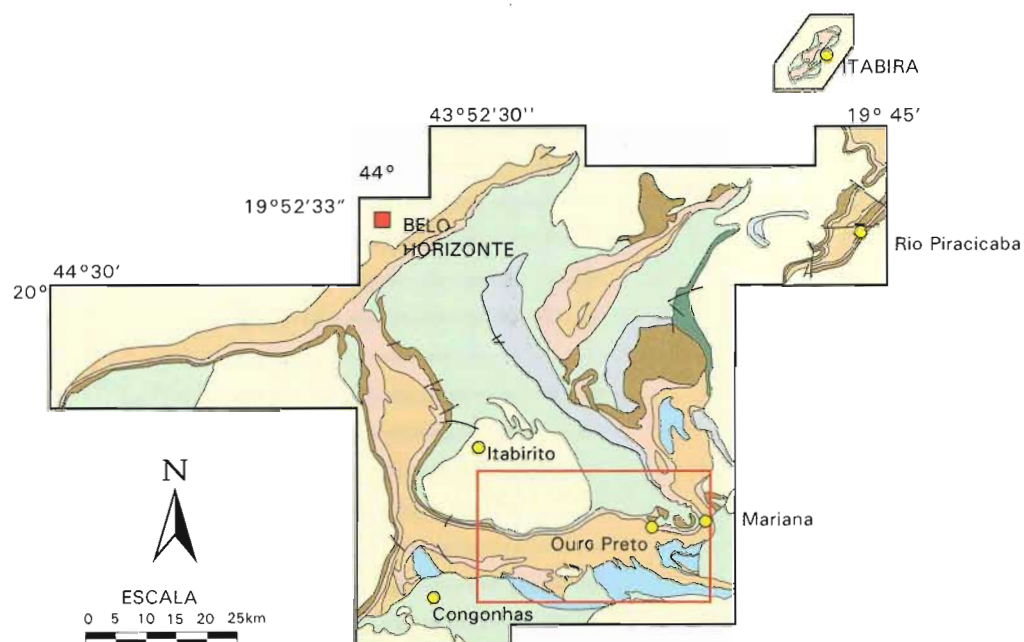




Foto 3. Vista da mina de topázio imperial de Capão do Lana, em Rodrigo Silva (Ouro Preto - MG).
(Foto: Antonio Liccardo).

As mineralizações de topázio imperial encontram-se nas Formações Cercadinho, Fecho do Funil e Sabará, pertencentes ao Supergrupo Minas (Olsen 1971; Fleischer 1972), no Quadrilátero Ferrífero, que é circundado por complexos granito-gnáissicos arqueanos e transamazônicos, com o Complexo do Bação situado no seu interior. Ocorrem ainda duas seqüências de rochas supracrustais: o Supergrupo Rio das Velhas, um *greenstone belt* de idade arqueana; e o Supergrupo Minas, uma seqüência plataformar de idade proterozóica inferior (Chemale Jr. *et al.* 1991).

Na região de Ouro Preto, o topázio está associado a dois condicionantes geológicos (Figura 4); um, no anticlinal de Mariana em rochas do Grupo Itabira (jazida de Antônio Pereira) e o outro, no eixo do sinclinal Dom Bosco, ao longo de uma faixa Leste-Oeste com cerca de 40km de extensão, principalmente em rochas do Grupo Piracicaba (demais ocorrências) (Ferreira 1983; Pires *et al.* 1983). Olsen (1971) denominou de brown terrena (chamado de BT por Pires *et al.* 1983) ao material caulínico de coloração castanho, em que é explotado o topázio imperial.

Na rocha alterada, o topázio imperial é encontrado em geodos (chamados *buchos* pelos mineradores) e veios caulinizados, de dimensões centimétricas a decimétricas, que estão encaixados em rochas dolomíticas metamorfizadas, muito intemperizadas e de coloração castanha escura (Ferreira 1991). Nos veios caulinizados, além do quartzo e dolomita, podem estar presentes especularita, moscovita, rutilo, euclásio e florencita (Gandini 1994).

É conhecido apenas um afloramento em que o topázio é encontrado em rocha inalterada, próximo à rodovia Belo Horizonte/Ouro Preto, no local chamado Bocaina (Figura 4). Constitui-se de mármore dolomítico amarelo-claro, pertencente à Formação Fecho do Funil. A mineralização de topázio ocorre em veios centimétricos, compostos essencialmente por quartzo e/ou dolomita.

Nas jazidas do Capão do Lana e do Vermelhão, os veios mineralizados estão intimamente relacionados a falhas nas rochas dolomíticas do Grupo Piracicaba, sendo o topázio imperial gerado por hidrotermalismo, associado à fase final do último evento de vulcanismo ácido que afetou a região (Ferreira 1983; Ferreira 1991). Durante o Cretáceo e início do Terciário, houve uma reativação de falhas, gerando possíveis canais de percolação para essas soluções que seriam responsáveis pelas mineralizações de topázio nos metassedimentos Minas (Alkmim & Marschak 1998). O topázio, normalmente, ocorre em massas de caulim em rochas carbonatadas intemperizadas, de coloração marrom escuro (*brown terrena*), chamadas *borra de café* pelos garimpeiros. Na Mina do Capão do Lana, o topázio é retirado do produto da alteração do veio e da encaixante, por meio de desmonte hidráulico, seguido pela coleta com o uso de caçamba (*drag line*), lavagem, peneiramento, jigagem e, por último, a catação manual dos cristais numa correia transportadora.

Nessa mina, em média a cada 100m³ de material retirado, é extraído 1kg de topázio, dos quais 1%, ou seja 10g, apresenta qualidade gemológica (Gandini 1994).

No Garimpo do Trino (Figura 4), a Noroeste de Rodrigo Silva, foram executadas sondagens visando delimitar a porção mineralizada em topázio imperial. Determinou-se um nível verticalizado portador de *borra de café* com espessura de até 10m, inserida em filitos hematíticos com intercalações de quartzitos da Formação Cercadinho. Tem-se um sistema de fraturamento vertical a subvertical condicionante das alterações metassomáticas de porções dolomíticas dessa formação, resultando nas ocorrências de pequenas cavidades com quartzo, hematita especular e topázio imperial (Addad & Liccardi 2001).

Figura 4. Geologia das ocorrências e jazidas de topázio na região de Ouro Preto (Gandini *et al.* 2000, adaptado de Dorr II 1969).

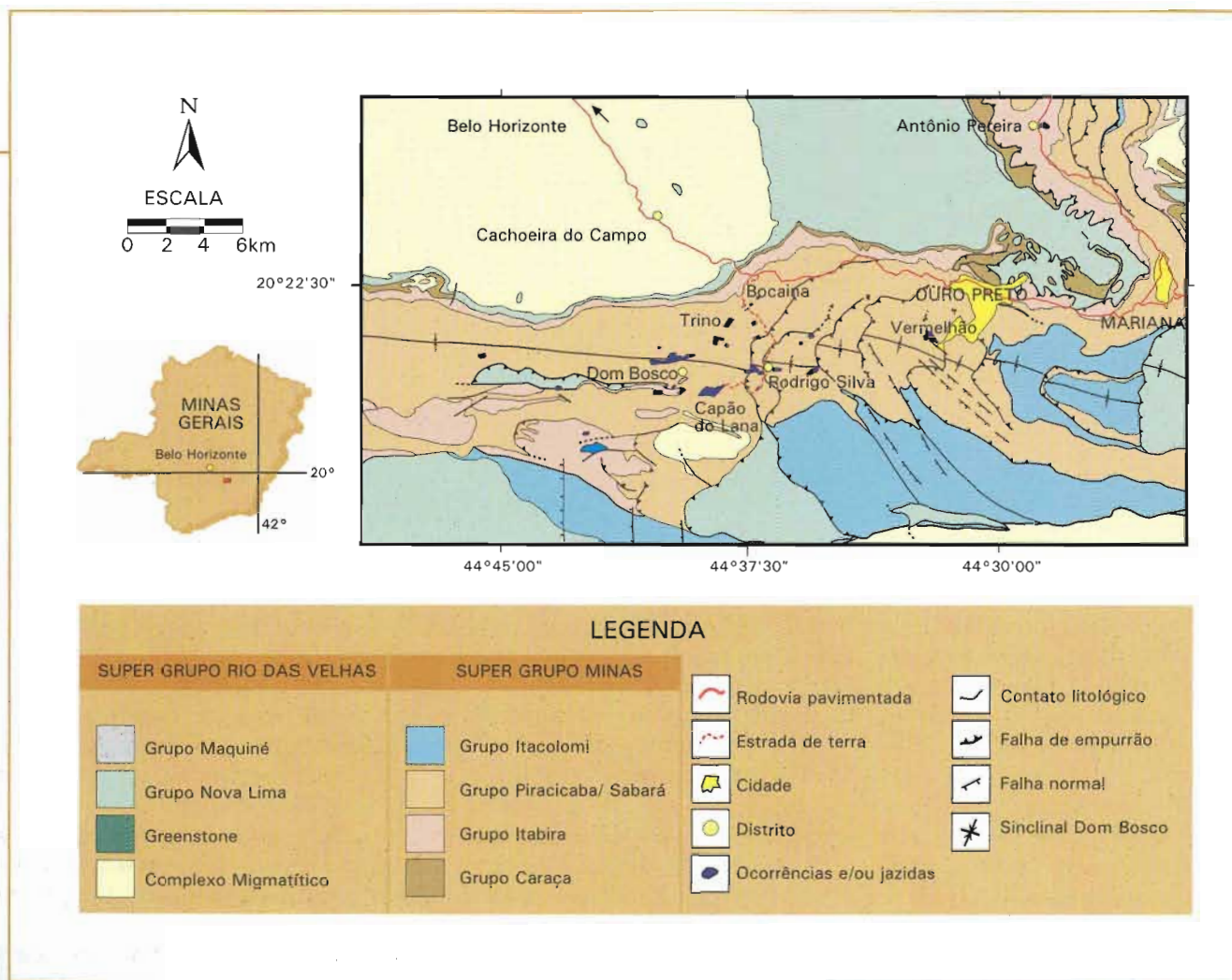




Foto 4. Detalhes da exploração de topázio imperial. Mineração Topázio Imperial, Capão do Lana (Ouro Preto - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

Mineralogia do Topázio Imperial

O topázio imperial apresenta-se sob a forma de cristais prismáticos, com dimensões variando desde alguns milímetros até 20cm. Normalmente, tais cristais ocorrem sob a forma de agregados e fragmentos, predominando os tipos idiomórficos constituídos de dois prismas rômnicos verticais, terminados por uma bipirâmide rômica. São raros os cristais biterminados como um espécime de 13cm de comprimento encontrado em Saramenha, bairro de Ouro Preto. Outro com terminação simples do mesmo tamanho, porém pesando 180g, límpido e com uma coloração vermelho conhaque, foi retirado do garimpo de Antônio Pereira e hoje se encontra em exposição no Museu de Mineralogia da Escola de Minas.

Na rocha alterada, o topázio ocorre em cristais prismáticos uni e biterminados, enquanto, nos aluviões, encontram-se dois tipos: o primeiro, prismático mas com arestas arredondadas; e o segundo, na forma de seixos ovais. Exemplos do primeiro tipo são os cristais dos ribeirões do Maracujá e Azul e dos córregos do Cipó, Fundão e Papa-Cobra e, do segundo caso, os da região do Salto e da Barraginha (Gandini 1994).

O topázio da região de Ouro Preto pode se apresentar em cores variáveis de amarelo, laranja, rosa e avermelhado (cor de conhaque) e raramente incolor e verde. Às vezes, é comum empregar o termo *sherry* (jerez ou rosé), para cristais de coloração



Foto 5. Exemplares lapidados de topázio imperial, mostrando cores e tonalidades distintas. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

castanho amarelado ou castanho alaranjado. Em alguns raros casos, esses cristais se apresentam bicolors, mostrando um zonamento do centro para as bordas ou ao longo do eixo *c*. Cristais desse tipo são encontrados nas jazidas de Bela Vista, Capão do Lana e Dom Bosco (Gandini 1994).

As análises dos parâmetros de cela unitária mostraram que a_0 varia de 4,615 a 4,656 Å, b_0 de 8,747 a 8,815 Å, c_0 de 8,375 a 8,412 Å, e o volume da cela unitária de 340,639 a 343,823 Å³. A densidade relativa está compreendida entre 3,40 e 3,59 (Gandini 1994).

Em relação aos índices de refração, n_X varia de 1,615 a 1,628, n_Y de 1,618 a 1,631 e n_Z de 1,625 a 1,639; a birrefringência de 0,008 a 0,015 e o ângulo $2V_z$ varia de 62 a 67°.

As inclusões cristalinas são representadas por carbonatos, topázio, hematita, ilmenita, mica, rutilo, quartzo, tremolita, euclásio, cloritóide e apatita, e ocorrem em número bem menor que as inclusões fluidas (Gandini 1994).

As inclusões fluidas são predominantemente bifásicas a 25°C, sendo constituídas por soluções aquosas salinas, CO₂, N₂ e CH₄. Foram observadas diversas feições morfológicas dispostas segundo orientações cristalográficas distintas. É comum a presença de inclusões fluidas alongadas, de contornos regulares, prismáticas ou canaliculos aciculares. Em casos mais raros, ocorrem inclusões fluidas tão grandes, que podem ser observadas a olho nu, com um comprimento de até 2cm. A população dessas inclusões é muito grande, não chegando, no entanto, a comprometer sua transparência. As maiores concentrações de inclusões fluidas estão localizadas em fraturas de cicatrização. No caso particular dos cristais do topázio da mina do Vermelho, além de inclusões bifásicas, aparecem também, algumas trifásicas (l+g+s) como também polifásicas (l+g+s₁+s₂). A temperatura mínima de formação dessas inclusões é de 300°C, com a pressão variando entre 2000 a 3000bar. Esses dados sugerem que o topázio foi formado a partir de fluidos hidrotermais originalmente imiscíveis, ocorrendo uma evolução por interação com as encaixantes, ao longo de percolação em diferentes profundidades (Bello *et al.* 1995; Gandini *et al.* 1991; Gandini 1994; Bello *et al.* 1996). Nessa interação, as soluções portadoras de berílio e flúor formaram o topázio imperial e o euclásio, raramente associado.

Análises químicas de topázios coloridos obtidas a partir de microsonda eletrônica (Gandini 1994) mostraram um teor médio de SiO₂ de 32,50%, Al₂O₃ de 54,90% e de F de 16,00% e, ainda, indicaram ser o Cr, V e Fe os possíveis cromóforos desse mineral-gema. Análise de zonas de cores diferentes em um mesmo cristal evidenciaram relações entre teores de cromóforos com a intensidades de cor. O topázio imperial, além de ser caracteristicamente rico em hidroxila, pode apresentar substituições por metais de transição trivalentes, incorporados nos sítios do Al³⁺. Tais substituições estão relacionadas às causas de cor. Várias propriedades físicas do

topázio estão relacionadas com a razão F/OH. Em geral, quanto maior o teor de flúor, maior a densidade e o ângulo $2V_z$, e menor os índices de refração e o parâmetro b_0 (Rosenberg 1967; Ribbe & Rosenberg 1971).

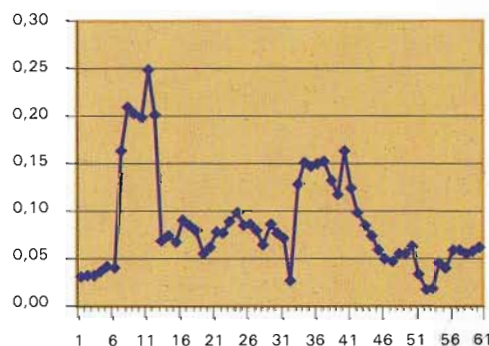
A partir de análise química efetuada em topázio de cores diferentes da região de Dom Bosco, foi verificada a presença dos possíveis cromóforos Cr, V e Fe. O cromo aparece em maior porcentagem no topázio rosa, seguido do amarelo e laranja, estando presente em menor teor no esverdeado, amarelo claro e incolor. O vanádio é detectado nas cores rosa, amarela, amarelo claro e esverdeada, enquanto o ferro se destaca no esverdeado e em menor teor no rosa e incolor (Gandini 1994). Análises espectroscópica de absorção óptica e microsonda eletrônica em topázio laranja dessa mesma região revelaram um enriquecimento significativo de Ti, Cr, Fe, V, e Mn, sendo que o EPR revelou o V^{4+} em duas posições cristalográficas não equivalentes e o Mn^{3+} , Ti^{4+} , Cr^{3+} e Fe^{3+} , associado a mudanças de intensidade de cor (Gandini *et al.* 2000b). Análises por ativação neutrônica mostraram que, além dos elementos citados, também o Cs exibe uma correlação com a variação de intensidade do vermelho (Oliveira *et al.* 2000).

Amostras de topázio imperial do garimpo do Trino, região de Ouro Preto, com um zonamento concêntrico ao eixo cristalográfico c e manchas lilases nas arestas do prisma, foram analisadas ao longo de uma linha em um plano transversal a esse eixo. Entre os elementos analisados, o cromo mostrou uma relação direta entre teor e cores avermelhadas mais intensas. Os teores de Cr_2O_3 são de 0,13 e 0,16% no centro laranja avermelhado, entre 0,06 a 0,10% na zona intermediária arroxeada clara; 0,20 até 0,25% na mancha lilás forte, e de 0,03 a 0,04% na borda amarela clara (Figura 5). Outros elementos como o Fe, Mg, Mn, Ni, Al, Si e F não mostram correlação com o zonamento transversal. Portanto, existe uma relação direta entre o teor de cromo e a intensidade da cor vermelha nos topázios imperiais (Addad & Liccardo 2001).

Quando submetido a tratamento térmico, o topázio imperial mostra uma mudança de cor para a tonalidade rosa em torno de $400^\circ C$, ficando incolor a partir de $900^\circ C$. O topázio transforma-se em mulita aos $1.100^\circ C$, a hidroxila é removida a $1.200^\circ C$ e o flúor a $1.320^\circ C$ (Costa *et al.* 2000).

Em termos gemológicos, os tratamentos aplicáveis ao topázio imperial são o térmico e o de preenchimento de fraturas. O tratamento térmico de topázio imperial não é interessante, pois sua mudança é para matizes menos valorizados, ou seja, há modificação do vermelho conhaque para um tom rosa e, finalizando, como incolor. O preenchimento de fraturas consiste na colocação de resinas estáveis e com o mesmo índice de refração em fissuras da gema.

Figura 5. Relação dos teores de Cr_2O_3 com a intensidade de vermelho, em topázio do garimpo do Trino (Addad & Liccardo 2001).



—●— Perfil

Levando-se em conta que o topázio imperial possui hábito prismático alongado, as formas de lapidação mais adequadas são oval, retangular, lágrima, navete e esmeralda. Durante esse processo, deve-se considerar a clivagem perfeita, uma vez que impactos podem partir a gema ao longo do plano (001), além de influenciar seu polimento final. A mesa da pedra deve ser posicionada com inclinação de 10 a 15° em relação ao plano de clivagem, enquanto que o ângulo ideal entre a cintura e as facetas da coroa deve ser de 43°, e, entre a cintura e o pavilhão, de 39°, visando a uma maior reflexão da luz no interior da gema. Seu brilho excepcional deve-se à elevada dureza, que permite um ótimo polimento. Raramente é encontrado topázio imperial com mais de 10ct e isento de defeitos. Quando mostra defeitos ou fissuras, seu valor cai abruptamente, confeccionando-se gemas na forma de cabochões ou usando-se o cristal natural na elaboração de jóias. Pedras de boa qualidade, com coloração conhaque acentuada, podem alcançar valores de até US\$1,200.00 por quilate (Gandini, 1994).

Topázio Incolor e Azul

As variedades gemológicas do topázio incolor e azul são mais comuns e menos valorizadas do que o topázio imperial. Apresentam-se nas cores azul claro, verde claro, amarelo claro, incolor e castanho. Diferentemente do topázio imperial, sua gênese está relacionada a outros tipos de rochas como granitos e *greisens*, riolitos, veios hidrotermais, sendo mais comum nos depósitos pegmatíticos e secundários, a eles associados. Nesses ambientes, a sua formação estaria ligada à ação de soluções ricas em flúor, que percolam as rochas. Mais raramente, são encontrados em zonas de metamorfismo de contato. Outro tipo de depósito muito importante são os secundários, particularmente aqueles associados a cascalheiras aluvionares em distritos pegmatíticos, em que o topázio aparece na forma de seixo rolado.

Dados geoquímicos demonstram que a gênese também pode ser interpretada com base na razão OH/F. Os topázios ricos em flúor (razão OH/F baixa) estão ligados a cavidades riolíticas, enquanto os ricos em hidroxilas (razão OH/F alta) a pegmatitos e *greisens* (Rosenberg 1967).



Foto 6. Topázio da região de Padre Paraíso, irradiado e adquirindo as tonalidades denominadas de *Sky Blue* e *London Blue*. Itagemas, Ouro Preto - MG. (Foto: Antonio Liccardo).

193

No Brasil, os pegmatitos são os grandes produtores de topázio azul gemológico, que é encontrado, principalmente, nos pegmatitos de Minas Gerais, Bahia, Ceará e Espírito Santo. O Estado de Minas Gerais é o grande produtor de topázio incolor, límpido, indicado para tratamento por irradiação, além dos grandes espécimes, com faces perfeitas, em exibição nos grandes museus do mundo. Os *greisens* e os igarapés produtores de cassiterita na Amazônia, principalmente no estado de Rondônia, também produzem cristais incolores a azul claro, com boa transparência.

A irradiação, seguida de tratamento térmico, é uma prática usual no mercado de topázio azul. As gemas recebem denominações comerciais, já consagradas, como *sky blue* e *london blue*, referindo-se a diferentes tonalidades de azul. Normalmente, a qualidade final apresentada pelo topázio para irradiação está relacionada ao tipo de rocha hospedeira. Topázios provenientes de *greisens* (da Amazônia) mostram-se incolores e, após tratamento, os resultados não são satisfatórios, sendo a mudança para a cor azul pequena, ou mesmo não ocorrendo. Naqueles provenientes de pegmatitos intrudidos em gnaisses, como na região de Catugi e dos aluviões de Marambaia (Minas Gerais), com cristais amarelo variando de tons claros a intensos, quando irradiados, resultam num azul profundo; nos pegmatitos intrudidos em mica xisto, como em Virgem da Lapa, onde os exemplares são incolores a azuis, após irradiados, tendem para um matiz azul menos intenso. Sintetizando, existe uma relação entre a intensidade da cor natural e a cor azul resultante do tratamento.

Em Minas Gerais, os principais produtores de topázio gemológico são os depósitos aluvionares e coluvionares do vale do rio Marambaia (região de Padre Paraíso) e o Distrito Pegmatítico de Araçuaí (Virgem da Lapa e Itinga). No vale do Marambaia, o topázio rolado é encontrado associado à água-marinha e, raramente, crisoberilo comum e olho-de-gato, enquanto que, no Distrito de Araçuaí, o topázio é retirado da rocha pegmatítica juntamente com lepidolita, cleavelandita, herderita, turmalinas e berilo rosa.

Amostras de coleção excepcionais, algumas pesando dezenas de quilos, foram extraídas destes pegmatitos, notadamente as Lavras do Limoeiro e do Xanda, em Virgem da Lapa. Tais lavras produziram grandes espécimes euédricos, nas cores azul, dourado e amarelo, famosos em todo o mundo. A Lavra do Xanda tornou-se famosa devido à produção de cristais gigantes, alguns de cor azul, mostrando faces perfeitas, chegando até 30kg. No Museu de História Natural de Nova York, está exposto um cristal de topázio facetado, sem nenhum defeito, pesando cerca de 4kg, oriundo da região de Araçuaí.

Bibliografia Consultada

- Addad, J.E. & Liccardo, A. 2001. Correlação cromo-intensidade de cor em topázio imperial, Ouro Preto, MG. In: SBG. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 11, Belo Horizonte, 2001. Anais... Belo Horizonte, no prelo.
- Alkmim, F.F. & Marchak, S. 1998. *Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. *Precambrian Research*, 90:29-58.
- Bello, R. M. S.; GANDINI, A. L.; FUZIKAWA, K.; SVISERO, D. P. 1995. Estudo microtermométrico de inclusões fluidas do topázio imperial da jazida da Boa Vista, Ouro Preto, MG. *REM Revista da Escola de Minas*, 48(2):111-116.
- Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Gandini, A. L.; Valarelli, J. V.; Svisero, D. P. 1996. *Fluid inclusion microthermometry of imperial topaz from Capão do Lana deposit, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil*. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 68 (1):91-102.
- Bello, R. M. S.; Svisero, D. P.; Gandini, A. L.; César-Mendes, J.; Valarelli, J. V.; Schultz-Güttler, R. A. 1991. Inclusões fluidas em gemas brasileiras. *Boletim IG-USP. Publicação Especial*, 9:9-12.
- Cassedanne, J. P. 1989. *Famous minerals localities: The Ouro Preto Topaz Mines*. *The Mineralogical Record*, 20:221-233.
- César-Mendes, J. & Gandini, A. L. 2000. *Guide to the major colored gemstone deposits in the vicinity of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil*. In: *Post-Congress Field Trip. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, August 6-17, 2000, Field Trip Aft20*, 58p.
- Chemale Jr., F.; Rosière, C. A.; Endo, I. 1991. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Revista Pesquisa*, 18 (2):104-127.
- Costa, G. M.; Sabioni, A. C. S.; Dereppe, J. M.; Moreaux, C.; Ferreira, C. M. 2000. Influência da temperatura nas propriedades físicas e químicas do topázio imperial. In: *Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas*, 1, Ouro Preto, 2000. *Boletim de Resumos...Ouro Preto*, 1:53.
- Deer, W. A.; Howie, R. A.; Zussman, J. 1982. *Rock-forming minerals: orthosilicates*. 2.ed. London, Longman. 919p. (v. 1A).
- Dorr II, J. V. N. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. *USGS Professional Paper*, 641A:1-109.
- Ferreira, C. M. 1983. Vulcanismo ácido no Quadrilátero Ferrífero e sua relação com algumas ocorrências e/ou depósitos minerais. In: *Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 2., Belo Horizonte, 1983. *Anais... Belo Horizonte, SBG*. 3:128-133.
- Ferreira, C. M. 1991. Topázio de Ouro Preto, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E. T.; Coelho, C. E. S. *Principais Depósitos Minerais do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM. 4:303-308.
- Fleischer, R. 1972. *Origin of topaz deposits near Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil*. *Discussions. Economic Geology*, 67(1):119-120.
- Gandini, A. L. 1994. Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 212p.
- Gandini, A. L.; Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Marciano, V. R. P. O.; Pimenta, M. A.; Svisero, D. P. 1992. Microtermometria, absorção no infravermelho, espectroscopia micro Raman dos componentes químicos das inclusões fluidas dos topázios imperiais de Ouro Preto, MG. In: SBG, *Congresso Brasileiro de Geologia*, 37, São Paulo, 1992. *Boletim de Resumos Expandidos*. São Paulo, SBG, 2:111-113.
- Gandini, A. L.; Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Svisero, D. P.; Ferreira, C. M. 1991. Caracterização das inclusões fluidas dos topázios imperiais da região de Ouro Preto, MG. *Boletim IG-USP. Série Científica*, 22:61-72.
- Gandini, A. L.; Bello, R. M. S.; Fuzikawa, K.; Gaspar, J. C.; Botelho, N. F.; Coelho, S. V.; Marciano, V. R.; Pimenta, M. A.; Svisero, D. P. 1993. Aspectos mineralógicos, geoquímicos e genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. In: *Universidade do Porto, Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, 2. Porto, 1993. *Memórias... Porto*, 1993. 3:233-237.
- Gandini, A. L.; César-Mendes, J.; Svisero, D. P. 1994. Correlação entre as propriedades mineralógicas e a razão OH-/F- presente nos topázios imperiais da região de Ouro

- 195
- Preto, MG. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário Camboriú, 1994. Boletim de Resumos Expandidos... Balneário Camboriú, 3:52-53.
- Gandini, A. L.; César-Mendes, J.; Svisero, D. P. 1992. Dados mineralógicos preliminares de topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, 1992. Boletim de Resumos Expandidos... São Paulo, SBG, 2:110-111.
- Gandini, A. L.; Rager, H.; Schott, S.; Schürmann, K.; Taran, M.; Roeser, H. 2000. Investigação da cor alaranjada no topázio da região de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 1, Ouro Preto, 2000. Boletim de Resumos...Ouro Preto, 1:55.
- Klein, C. & Hurlbut Jr., C. S. 1985. *Manual of mineralogy*. 20. ed. New York, John Wiley & Sons. 596p.
- Oliveira, E. F.; Ferreira, C. M.; Sabioni, A. C. S. 2000. Aplicação da análise por ativação neutrônica para a determinação de elementos em teores de traço em topázio imperial. In: Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 1, Ouro Preto, 2000. Boletim de Resumos...Ouro Preto, 1:43.
- Olsen, D. R. 1971. *Origin of topaz deposits near Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. Economic Geology*, 66(4):627-631.
- Pires, F. R. M.; Freitas, C. O.; Palermo, N.; Sarciá, M. N. G. 1983. Geologia e gênese dos depósitos de topázio do Distrito de Ouro Preto - Minas Gerais. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2, Belo Horizonte, 1983. Anais... Belo Horizonte, 3:283-296.
- Rager, H.; Schürmann, K.; Taran, M.; Roeser, H. 2000. *Investigations on colours and-variations of Topazes from Minas Gerais (Brazil). IMA meeting, Melbourne Australia, Abstracts (in press).*
- Ribbe, P. H. & Rosenberg, P. E. 1971. *Optical and X-ray determinative methods for fluorine in topaz. The American Mineralogist*, 56(9/10):1812-1821.
- Rosenberg, P. E. 1967. *Variation in the unit-cell dimensions of topaz and their significance. The American Mineralogist*, 52(11/12):1890-1895.
- Sauer, J. R. 1982. Topázio imperial. In: Sauer, J. R. Brasil, paraíso de pedras preciosas. São Paulo, Gráfica Editora Hamburg. p. 56-59.
- Webster, R. 1980. *Gems; their sources, description and identification. London, Butterworths. 938p.*

capítulo nove

C r i s o b e r i l o

M á r c i o S i l v a B a s í l i o

J ú l i o C é s a r - M e n d e s

A n t o n i o L i c c a r d o

I n t r o d u ç ã o

O crisoberilo é um mineral raro, de dureza elevada e que, em alguns casos, pode apresentar propriedades ópticas especiais. Foi descoberto no século XVII, em depósitos aluvionares do Sri Lanka (antigo Ceilão), associado à turmalina. Durante algum tempo, foi considerado como um tipo de turmalina ou de berilo, até ser identificado como uma espécie distinta por Werner, em 1789. O nome crisoberilo provém do grego e significa berilo amarelo ou dourado. A sua cor pode variar de incolor, quando puro, a amarelo, verde ou castanho devido à presença de metais-traço, como ferro e cromo.

Suas variedades gemológicas são o crisoberilo simples, crisoberilo olho-de-gato e a alexandrita. O crisoberilo simples refere-se ao cristal límpido e sem efeitos ópticos especiais. Farrell & Newham (1965) atribuíram a coloração amarelo-esverdeada do crisoberilo à presença de Fe^{3+} , substituindo o Al^{3+} nas posições octaédricas da estrutura cristalina. No Brasil, é também chamado de *crisólita*, o que gera certa confusão, já que o nome *crisólita* é normalmente usado como sinónimo de olivina. A origem desse engano remonta ao tempo Colonial, quando os termos crisoberilo e crisólita referiam-se a outros minerais como o berilo amarelo, topázio e olivina (Palache *et al.* 1944).

O crisoberilo olho-de-gato, também chamado de cîmofana ou simplesmente olho-de-gato, foi definido por Haüy, em 1798, e se caracteriza pela presença de uma faixa luminosa móvel, de aspecto leitoso e coloração branca, causada pela reflexão da luz sobre inúmeras inclusões aciculares ou cavidades tubulares paralelas ao eixo cristalográfico c do cristal. Esse fenómeno, chamado de acatassolamento ou *chatoyance*, é realçado quando a gema é lapidada na forma de cabochão, apresentando base paralela à direção das inclusões.

A alexandrita, a gema mais importante do grupo gemológico do crisoberilo, é extremamente rara e causa grande impacto visual, devido a sua peculiar característica de mudança de cor em função do tipo de luz incidente. Quando iluminada por luz natural (luz solar), apresenta-se verde ou, mais raramente, azul e, quando iluminada por luz incandescente, mostra-se vermelha, framboesa ou violeta. Esse fenómeno deve-se à presença de cromo em substituição ao alumínio e recebe o nome de efeito alexandrita (White *et al.* 1967).

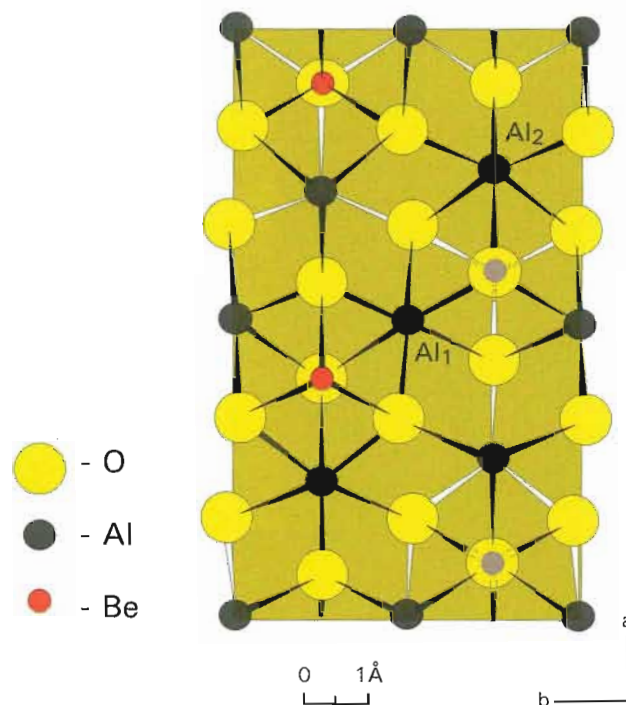
O Crisoberilo

O crisoberilo é um óxido de berílio e alumínio de fórmula BeAl_2O_4 . Cristaliza-se no sistema ortorrômbico, com parte do alumínio podendo ser substituída por ferro e cromo, o que interfere diretamente nas propriedades ópticas como a cor e o pleocroísmo, além da geração do efeito alexandrita.

Nesse mineral, os átomos de oxigênio distribuem-se segundo um empacotamento hexagonal denso, com 1/8 dos interstícios tetraédricos sendo ocupado por átomos de berílio e metade dos interstícios octaédricos ocupada por átomos de alumínio (Farrel *et al.* 1963) (Figura 1). Sua alta dureza e estabilidade química são resultantes da perfeita compactação da estrutura cristalina.

Na cela unitária do crisoberilo, os íons de berílio estão rodeados por quatro íons de oxigênio, enquanto o alumínio, em coordenação octaédrica com os íons de oxigênio, distribui-se em dois sítios de tamanhos diferentes. Metade ocupa sítios Al_1 - ligados a dois átomos de Be e metade ocupa sítios Al_2 - ligados a um único átomo de Be. Os dezesseis íons de oxigênio da célula unitária

Figura 1. Estrutura do crisoberilo projetada em 001 (Farrel *et al.* 1963).



apresentam um empacotamento hexagonal denso (Figura 1). A substituição de alumínio por cromo na estrutura do crisoberilo, em pequenas percentagens, origina o efeito alexandrita, já a cor amarela está associada à presença de Fe^{3+} substituindo o alumínio (Farrel *et al.* 1963; Farrel e Newnham 1965; Hassan e El-Rakhawy 1974; Schmetzer *et al.* 1980; Nassau 1983). A Tabela 01 apresenta as principais propriedades cristalográficas e ópticas do crisoberilo e da variedade alexandrita. A Figura 2 mostra as orientações dos eixos cristalográficos e a geminação cíclica característica do crisoberilo.

O crisoberilo ocorre, principalmente, em pegmatitos e, muito raramente, em escarnitos, mármore dolomíticos e gnaisses (Henn 1995). Para Beus (1966), a formação do crisoberilo está associada a pegmatitos dessilicificados e a pegmatitos ricos em Al_2O_3 . Os pegmatitos dessilicificados têm uma mineralogia contendo coríndon, espinélio, clorita, margarita, moscovita, flogopita, plagioclásio, fluorita e apatita; enquanto os pegmatitos graníticos ricos em Al_2O_3 são portadores de estauroлита, granada, cianita, moscovita, plagioclásios, gahnita, berilo e quartzo.

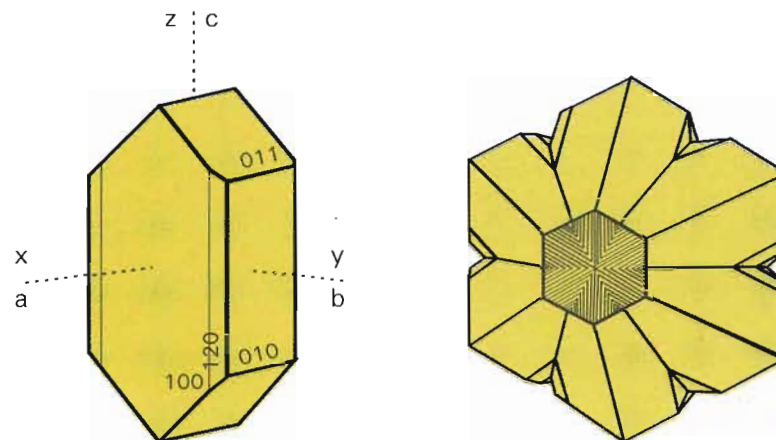
Para Heinrich & Buchi (1969) e Franz & Morteani (1984), a cristalização do crisoberilo nos pegmatitos graníticos não ocorre diretamente do fluido pegmatítico, mas a partir de reações de consumo do berilo.

Tabela 1

Resumo das principais propriedades cristalográficas e ópticas do crisoberilo (baseado em Klein e Hurlbut 1994 e Webster 1980).

Sistema cristalino		Ortorrômbico.
Simetria		Ortorrômbica - bipiramidal.
Dimensões da célula unitária		$a_0 = 5,47$; $b_0 = 9,39$; $c_0 = 4,42$
Forma e hábito		Cristais tabulares finos ou prismas curtos. Geminacões cíclicas, resultando cristais pseudo-hexagonais.
Cor	crisoberilo	Verde, amarelo e castanho em diversos matizes.
	alexandrita	Verde ou verde azulado (luz natural) mudando para vermelho ou violeta (luz incandescente).
Brilho		Vítreo.
Clivagem		Imperfeita {001}
Dureza relativa		8 (Mohs)
Densidade relativa		3,55 a 3,83
Sinal óptico		Biaxial positivo.
Índice de refração		$\gamma = 1,756$; $\beta = 1,748$; $\alpha = 1,746$
Ângulo 2V		45°
Pleocroísmo	crisoberilo	Amarelo; amarelo esverdeado e incolor.
	alexandrita	Verde azulado; amarelo e vermelho.

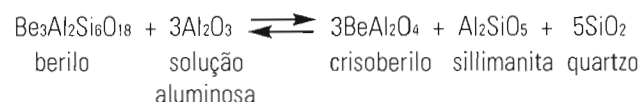
Figura 2. Orientação dos eixos cristalográficos e geminação cíclica, característica do crisoberilo (Tröger 1971 e Klein & Hurlbut 1994).



As reações a seguir ilustram a formação do crisoberilo em ambientes pegmatíticos, com contaminação de Al_2O_3 :



ou



De maneira distinta, Somam & Nair (1985) sugerem a formação do crisoberilo diretamente de fusões pegmatíticas ricas em CO_2 . A presença de CO_2 provoca um aumento de solubilidade da sílica e favorece a concentração de berílio e alumínio na fusão residual.

Alexandrita

Em 1833, o explorador sueco Nils Nordenskiöld descobriu nos Montes Urais (Rússia) uma variedade de crisoberilo que apresentava uma mudança de cor muito acentuada, conforme o tipo de luz incidente: verde sob luz natural e vermelha sob luz incandescente. Essa nova gema foi batizada como alexandrita, em homenagem a Czarevitch Alexander Nicolajevitch, futuro Czar Alexandre II, que naquele dia

completava 12 anos de idade. A partir dessa época, a alexandrita tornou-se símbolo nacional da Rússia, pois além de esse país ser o único produtor mundial dessa gema, as cores verde e vermelho eram as mesmas do exército czarista (Bauer 1968; Gübelin & Schmetzer 1982).

Após mais de cem anos de exploração, as jazidas russas praticamente se esgotaram. Entre as décadas de 60 e 80, o Sri Lanka despontou como a única fonte comercialmente importante de alexandrita desde a queda da produção russa. Algumas alexandritas do Sri Lanka apresentavam o efeito olho-de-gato e cores mais fortes, principalmente o vermelho intenso sob luz incandescente, tornando-as mais valorizadas do que as russas (Proctor 1988).

No final dos anos 70, do século XX, começaram a aparecer no mercado mundial as alexandritas brasileiras, provenientes de pequenos garimpos dos Estados da Bahia e do Espírito Santo. Porém, a produção se revelou muito pequena e de baixa qualidade.

No Estado de Minas Gerais, a primeira descoberta aconteceu no Córrego do Fogo, município de Malacacheta, em 1975. Essa região tornou-se a principal produtora das alexandritas encontradas no mercado mundial até 1987. Com a descoberta de alexandrita no distrito de Hematita, município de Antônio Dias, em 1986, os outros garimpos brasileiros foram praticamente abandonados, acontecendo uma verdadeira corrida atrás do novo *eldorado* (Basílio 1999; César-Mendes & Liccardo 2000).

A Jazida de Hematita é considerada pelos estudiosos, comerciantes e colecionadores a maior descoberta de alexandrita da história e colocou o Brasil como o seu maior produtor mundial.

Logo após a descoberta em Hematita, no intervalo de 1982 a 1987, o pequeno aluvião foi invadido por garimpeiros, que criaram uma cooperativa e tentaram delimitar uma área legal de garimpagem. Ao mesmo tempo, várias empresas de mineração entraram com pedido de pesquisa nessa área. Após longa disputa judicial, empresas foram autorizadas a lavrar os aluviões dos dois córregos, com a conseqüente retirada dos garimpeiros com suporte policial. Atualmente, a área é explorada por duas empresas: a Alexandrita



Foto 1. Magnífico cristal de alexandrita, pesando 28,2g e intenso vermelho sob luz incandescente. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo)



Foto 2. Alexandritas brutas e lapidada. O cristal maior pesa 20g. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo)

Mineração Comércio e Exportação Ltda., detentora da maior jazida de alexandrita no mundo, com uma reserva medida de, aproximadamente, 60kg e a Mineração Itaitinga, pertencente à família de Xisto Andrade de Oliveira, que detém os direitos de exploração desde 1982, com funcionamento legal desde 1991 e com uma produção inconstante.

Além dessas duas jazidas, existem outras ocorrências de alexandrita em Minas Gerais, porém sem importância econômica. Entre elas, podem ser citadas as associadas às jazidas de esmeralda, como em Belmont, Capoeirana e Esmeraldas de Ferros.

Gênese da Alexandrita

Os processos apresentados anteriormente para a gênese do crisoberilo explicam a cristalização desse mineral em diferentes ambientes geológicos. Entretanto, para que ocorra a cristalização da alexandrita, além do excesso de alumínio e deficiência em sílica, é necessária a presença de uma fonte de cromo. Na grande maioria das ocorrências de alexandrita no mundo, são descritos processos geológicos envolvendo rochas ácidas e ultramáficas em ambientes ricos em alumínio (Munasinghe & Dissanayake 1981, Ustinov & Chizhik 1994, Laskovenkov & Zhernakov 1995, Franz *et al.* 1996, Matin-Izard *et al.* 1996, Basílio *et al.* 1998a, 1998b, Basílio 1999).

Em Minas Gerais, todas as jazidas de alexandrita estão localizadas na Província Pegmatítica Oriental.

Na Jazida de Hematita, observam-se inúmeros pequenos corpos pegmatóides cortando as rochas metaultramáficas da região, e, nos concentrados aluvionares, constata-se a presença de cianita, granada, berilo (esmeralda e água-marinha), crisoberilo, estauroлита, moscovita, plagioclásio e quartzo (incolor, violeta e enfumaçado). Desse modo, a Jazida de Hematita enquadra-se no modelo de Beus (1966) de pegmatitos graníticos ricos em Al_2O_3 .

Relacionando os aspectos geológicos observados na região de Malacacheta, como a presença de corpos graníticos e intercalações de rocha metaultramáfica com xisto peraluminoso, Basílio (1999) propôs uma gênese baseada num sistema



Foto 3. Vista do aluvião portador de alexandrita da Mineração Itaitinga, em Hematita (Nova Era-MG). (Foto: Márcio Basílio)

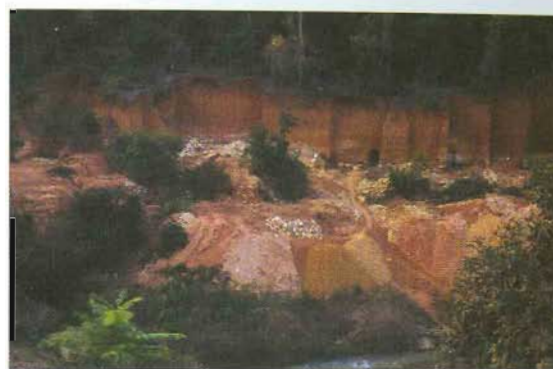


Foto 4. Vista da região produtora de crisoberilo comum e alexandrita. Córrego do Fogo (Malacacheta-MG). (Foto: Márcio Basílio)

metassomático envolvendo fluidos hidrotermais de alta temperatura, ricos em berílio e oriundos do corpo granítico. A interação desses fluidos com os xistos aluminosos e suas intercalações metultramáficas, fonte do cromo, propiciaram a formação da alexandrita. A rocha metassomática portadora de alexandrita foi erodida, já que os depósitos paleoaluvionares sugerem um intenso evento erosivo antigo.

Em relação às ocorrências de alexandrita associadas às jazidas de esmeralda, pouco se conhece.

Cor, Pleocroísmo e Efeito Alexandrita

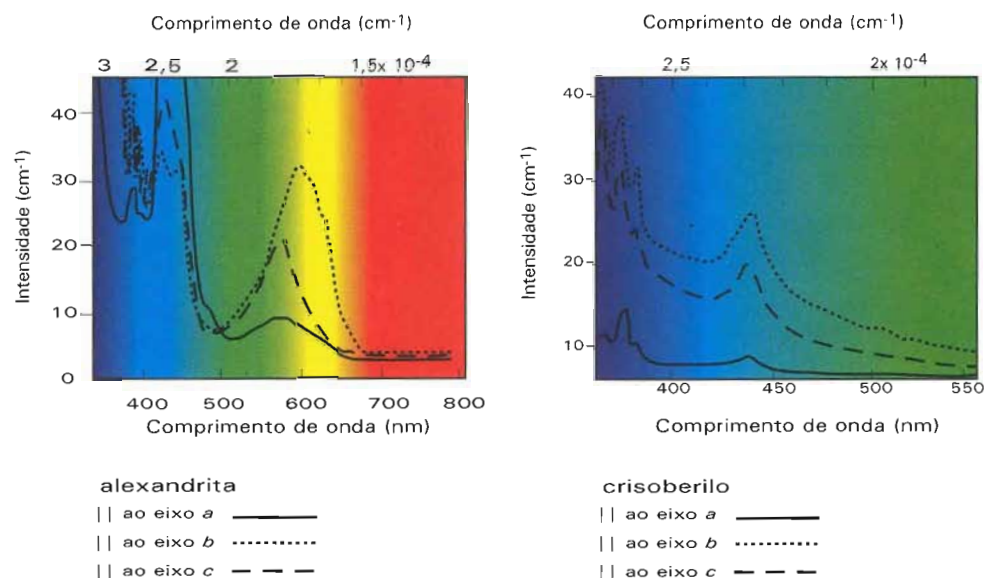
A cor, a mudança de cor (efeito alexandrita) e o forte pleocroísmo são fatores determinantes na qualidade da alexandrita.

Sob a luz natural, a alexandrita apresenta-se verde ou mais raramente azul e, quando iluminada por luz incandescente, mostra-se em tons vermelhos ou violeta. Seu intenso tricroísmo é característico, variando nas cores verde, amarelo, vermelho e, mais raramente, azul. Assim como no rubi e na esmeralda, sua cor é resultante da presença de íons Cr^{3+} substituindo parte do alumínio nas posições octaédricas da estrutura cristalina. Na alexandrita, que pode ser representada pela fórmula $\text{BeAl}_{2-x}\text{Cr}_x\text{O}_4$, tal substituição varia dentro de limites relativamente amplos, de 0,02% a 1,5% de Cr_2O_3 (Fritsch & Rossman 1987).

Farrel & Newnham (1965) estudaram os espectros de absorção obtidos com luz polarizada paralela aos eixos cristalográficos de uma alexandrita russa de fórmula estrutural $\text{Al}_{1,96}(\text{Cr}, \text{Fe})_{0,04}\text{BeO}_4$ e com pleocroísmo amarelo (paralelo ao eixo **a**); verde (paralelo ao eixo **b**) e vermelho (paralelo ao eixo **c**). Quando comparam-se esses espectros com os obtidos em um crisoberilo amarelo ($\text{Al}_{1,96}\text{Fe}_{0,04}\text{BeO}_4$), fica evidenciada a influência do cromo sobre o pleocroísmo (Figura 3).

Na alexandrita, observa-se que o espectro paralelo ao eixo **a** é dominado por intensa absorção na região do azul escuro (420nm), permitindo a transmissão de sua cor complementar: o amarelo (Farrel & Newnham 1965). A absorção para os comprimentos

Figura 3. Do lado esquerdo, o espectro de absorção de um cristal de alexandrita (luz polarizada) e, à direita, o espectro de absorção de um cristal de crisoberilo (luz polarizada) (Farrel & Newnham 1965).



de onda referentes ao azul ocorre paralela aos eixos **b** e **c**, mas a luz transmitida é influenciada por absorções diferentes a partir da região do amarelo (600nm). Paralelamente ao eixo **c**, a rede cristalina absorve o amarelo e transmite o vermelho. Paralelamente ao eixo **b**, a rede absorve os comprimentos de onda referentes ao amarelo e ao vermelho, resultando na transmissão do verde.

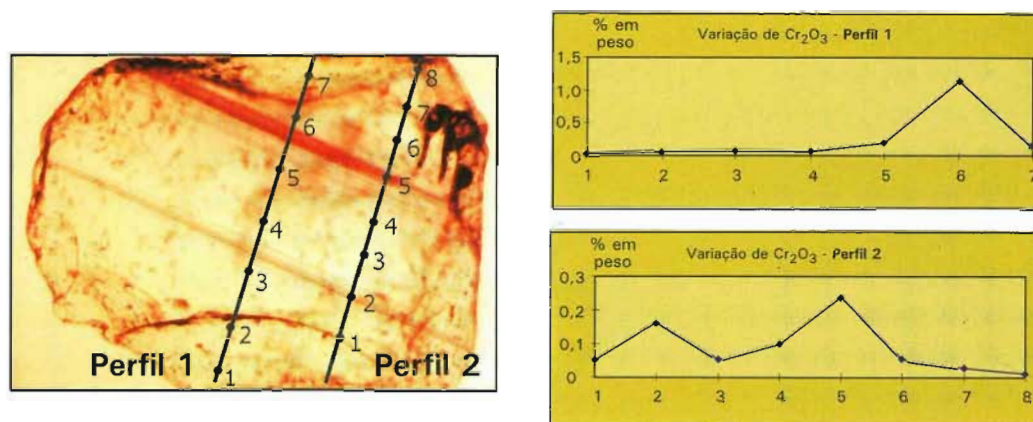
O pleocroísmo azul, muito comum na alexandrita de Malacacheta, está diretamente relacionado ao teor de Fe^{3+} , uma vez que esse metal promove um deslocamento do mínimo de absorção do espectro em direção ao verde (Basílio 1999; Pinheiro et al. 2000). Esse fato faz com que as alexandritas mais ricas em ferro transmitam os comprimentos da região do verde. Já a alexandrita pobre em ferro, como a de Malacacheta, apresenta sua janela de transmissão posicionada dentro da região do azul do espectro óptico.

Até o final da década de 60, o termo dicroísmo foi utilizado, sem distinção, para qualquer tipo de variação cromática em um mineral, independentemente do processo que a gerava. White *et al.* (1967) introduziram o nome efeito alexandrita para o fenômeno de mudança de cor dependente da luz incidente. O efeito alexandrita refere-se a uma intensa mudança de cor apresentada pela alexandrita e, mais raramente, por algumas outras gemas, como safira, granada, espinélio, cianita, turmalina, fluorita e monazita (Stalder *et al.* 1978, Schmetzer & Gübelin 1980, Schmetzer *et al.* 1980, Gübelin & Schmetzer 1982, Bernstein 1982, Bosshart *et al.* 1982, Kammerling *et al.* 1996, Liu et al. 1999).

A relação entre a presença de cromo e o efeito alexandrita pode ser observada no diagrama da Figura 4, que apresenta um perfil de análises por microsonda eletrônica, obtido ao longo um cristal de crisoberilo proveniente de Malacacheta, medindo cerca de 3 mm e portando duas finas zonas com efeito alexandrita.

Os dois sítios ocupados pelo alumínio (Figura 1) apresentam dimensões diferentes e com distâncias interatômicas de $\text{Al}_{(1)}\text{-O} = 1,890\text{\AA}$ e $\text{Al}_{(2)}\text{-O} = 1,934\text{\AA}$. Como o íon Cr^{3+} possui raio atômico maior ($0,63\text{\AA}$) que o do Al^{3+} ($0,51\text{\AA}$), a substituição ocorrerá preferencialmente no sítio $\text{Al}_{(2)}$. Entretanto, isso não elimina a possibilidade de algum íon cromo ocupar as posições de menor espaço na estrutura $\text{Al}_{(1)}$, principalmente se o mineral sofreu aumento de pressão e temperatura (Hassan & El-Rakhawy 1974).

Figura 4. Variação do teor de Cr_2O_3 num crisoberilo com duas faixas de intenso efeito alexandrita (Basílio 1999).



Para Gübelin & Schmetzer (1982), 65% a 80% do cromo ocupa o sítio $\text{Al}_{(2)}$, influenciando, principalmente, o espectro de fotoluminescência (Walling *et al.* 1979). Já a presença do cromo no sítio $\text{Al}_{(1)}$ produz um alargamento e eventual deslocamento das bandas de absorção da alexandrita.

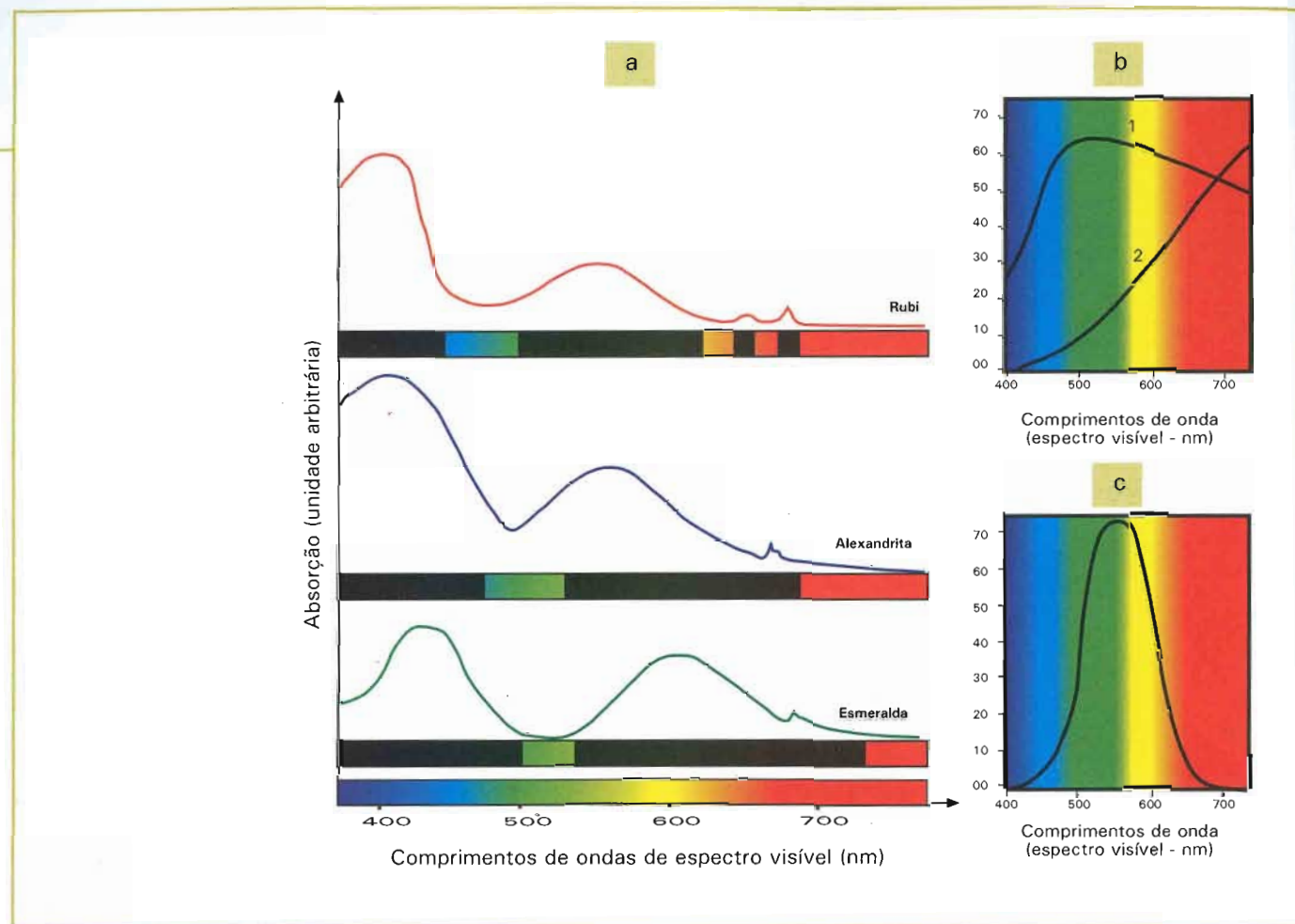
Uma vez que o espectro de absorção óptica de um mineral é resultado da absorção de energia necessária para as transições eletrônicas, a variação na razão entre o cromo nos sítios $\text{Al}_{(1)}$ e $\text{Al}_{(2)}$ explica as diferenças entre os matizes e a intensidade da mudança de cor entre os diversos espécimes de alexandrita.

O espectro de absorção da alexandrita (Figura 5a) indica máximos de transmissão na região do azul e azul-esverdeado (com pico em 490nm) e absorções na região do amarelo (570nm) e na região do vermelho até o infravermelho. Esse espectro é típico de minerais portadores de Cr^{3+} (Farrel & Newnham 1965; Hassan & El-Rakhawy 1974; Schmetzer *et al.* 1980; Gübelin & Schmetzer 1982; Fritsch & Rossman 1987).

Para se entender o efeito alexandrita, é necessário que sejam comparados os espectros da alexandrita, rubi e esmeralda com os espectros da luz solar e da luz incandescente e, ainda, com a curva de sensibilidade do olho humano para espectro da luz visível. O elemento cromo em coordenação octaédrica também é responsável pela cor no rubi e na esmeralda. Conseqüentemente, os espectros ópticos desses três minerais são semelhantes entre si, com duas amplas bandas de absorção de luz visível (Figura 5a). Apesar do mesmo estado de valência e da mesma coordenação octaédrica do cromo, as distâncias desse elemento em relação aos átomos de oxigênio diferem de um mineral para outro, o que gera variações da energia necessária para as transições eletrônicas (Gübelin & Schmetzer 1982). Como resultado disso, os deslocamentos relativos dos picos de absorção no espectro da luz visível, apesar de sutis, são suficientes para produzir cores e efeitos totalmente diferentes entre esses três minerais.

O espectro do rubi (Figura 5a) apresenta uma janela de transmissão na região do azul (480nm) e outra na região do vermelho (> 610nm). A janela de transmissão da esmeralda (Figura 5a) está totalmente centrada no verde (510nm). Portanto, o espectro da alexandrita pode ser considerado intermediário entre o espectro do rubi e o espectro da esmeralda, transmitindo as cores verde ou verde azulado e vermelho.

Figura 5. a) Comparação entre os espectros de absorção do rubi, alexandrita e esmeralda (Fritsch & Rossman 1987).
b) Espectro da luz do dia (1) e luz incandescente (2) (Gübelin & Schmetzer 1982).
c) Sensibilidade do olho humano no espectro visível (Gübelin & Schmetzer 1982).



No espectro que representa a luz solar, observa-se a predominância dos comprimentos de onda azul e verde (Figura 5b-1). Relacionando-se esse espectro à grande sensibilidade que o olho humano possui para o verde (Figura 5c), pode-se entender a total predominância dos tons esverdeados para alexandrita, quando iluminada pela luz do sol. No espectro da luz incandescente, entretanto, predominam os comprimentos de onda do amarelo, laranja e vermelho (Figura 5b-2). Uma alexandrita sob luz incandescente transmitirá o vermelho, uma vez que as ondas de comprimentos verde e azul estão praticamente ausentes nesse tipo de luz.

Dessa forma, o efeito alexandrita é consequência de dois fatores, um físico-químico e outro biológico. O primeiro é representado pela mudança nas transições eletrônicas provocadas pela presença do cromo e resulta na transmissão simultânea das cores verde e vermelha. O segundo é representado pela sensibilidade do olho humano, mais sensível para o verde e pouco sensível ao vermelho (Poole 1964; Hassan & El-Rakhawy 1974; Schmetzer *et al.* 1980; Gübelin & Schmetzer 1982; Fritsch & Rossman 1987).



Foto5. Minerais encontrados como satélites da alexandrita em Itaitinga (Nova Era-MG): esmeralda, água-marinha, crisoberilo, amethysta, turmalina, quartzo *fumê* e granada. (Foto: Antonio Liccardo)

Alexandrita em Minas Gerais

Em Minas Gerais, a alexandrita é encontrada geralmente em depósitos aluvionares, o que dificulta a sua prospecção. As duas jazidas existentes no estado, a de Malacacheta e de Hematita, foram descobertas ao acaso.

Em Malacacheta, a descoberta se deu em 1975, quando o fazendeiro João Rodrigues, acampando às margens do Córrego do Fogo, usou a lama do córrego para cobrir a mandioca que pretendia assar. Nessa lama encontrou pequenas pedras verdes, que acreditou ser turmalina. Mais tarde, essas pedras foram identificadas como alexandrita por um garimpeiro chamado João Vaqueiro.

Entusiasmado com a descoberta, João Vaqueiro montou uma turma de garimpeiros, mas, até 1979, garimpou sem muito sucesso o Córrego do Fogo. Nesse ano, na foz de um afluente da margem esquerda do Córrego do Fogo, apareceram os primeiros bolsões de alexandrita. A notícia se espalhou rapidamente e, já no final de 1979, cerca de 5000 garimpeiros estavam acampados no local.

A atividade garimpeira teve seu pico entre 1979 e 1987, transformando Malacacheta na principal jazida de alexandrita do mundo. Durante esse período, foram produzidos cerca de 2kg de gemas de qualidade excepcional e entre 6 e 7kg de gemas de qualidade inferior. Um dos espécimes mais impressionantes encontrado nesse período foi uma alexandrita pesando 18g, que, após lapidada, resultou em duas pedras com 13 e 15,6 ct (Proctor 1988). Outro espécime, retirado do Ribeirão Soturno, em 1985, foi um cristal pesando 14,6 g que, depois de lapidado, resultou num cabochão de 18,5ct, considerado uma das mais raras e finas alexandritas olho-de-gato do mundo.



Foto 6. Alexandrita lapidadas, apresentando cor vermelha intensa sob luz incandescente. A gema maior pesa 10,96 quilates e a menor 2,13. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo)

Com a descoberta, em 1987, da alexandrita de Hematita, o garimpo do Córrego do Fogo foi praticamente abandonado. Essa descoberta foi considerada como a maior da história e elevou o Brasil para a posição de primeiro produtor mundial da gema.

A história dessa jazida começou em 1986, quando duas crianças brincando próximo a uma plantação de arroz, na junção dos Córregos da Liberdade e da Derrubada, recolheram algumas pedras verdes, que mais tarde foram levadas para Santa Maria de Itabira e vendidas por um preço baixo a um comerciante, que pensou se tratar de andaluzita. Ao tentar vender a *andaluzita* em Teófilo Otoni, o comerciante descobriu que eram, na verdade, cristais de alexandrita. Com isso, teve início, em janeiro de 1987, o garimpo de Hematita. Nessa fase garimpeira, que durou cerca de três meses, pedras excepcionais foram encontradas, entre elas um lote de cinco pedras facetadas pesando 11 ct, vendidas por US\$40.000,00 (Proctor 1988).

Após uma série de disputas judiciais sobre a concessão de lavra, o garimpo foi fechado em junho de 1988 e reaberto em 1989 como mineração. A área foi, então, dividida em duas concessões, a Mineração Itaitinga e a Alexandrita Mineração Comércio e Exportação Ltda.

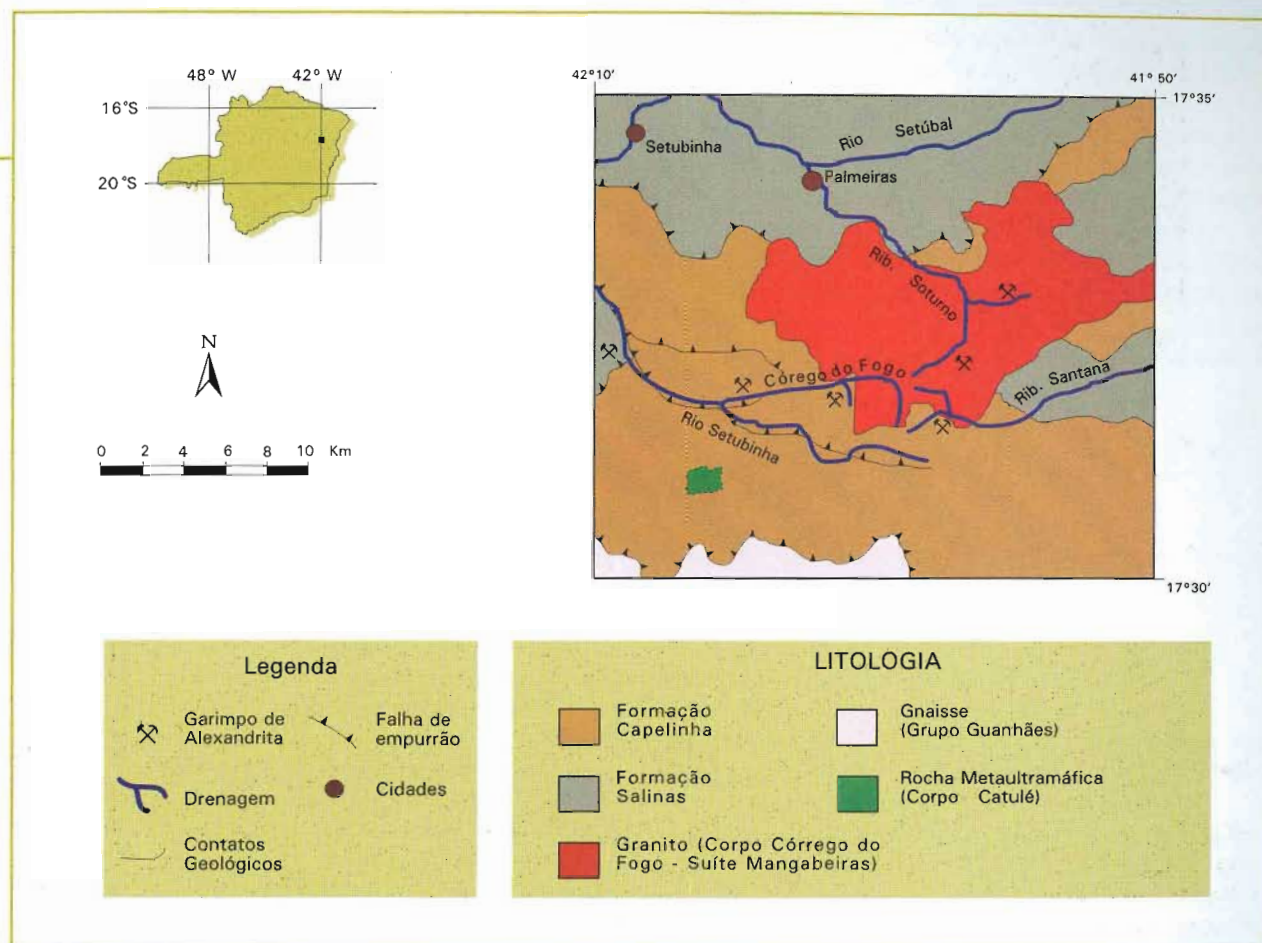
A seguir, serão descritas as duas jazidas de alexandrita do estado de Minas Gerais: Malacacheta e Hematita.

Malacacheta

Os principais depósitos situam-se ao longo de duas drenagens, o Córrego do Fogo e o Ribeirão Soturno. Em menor escala, os Ribeirões Santana e Setubinha também apresentam aluviões mineralizados em alexandrita.

Nessa área garimpeira, regionalmente ocorrem um corpo granítico e outro de rocha metaultramáfica (Voll & Pimenta 1997). O granito está intrudido nos xistos peraluminosos das Formações Salinas e Capelinha e a rocha metaultramáfica corta os xistos da Formação Capelinha (Figura 6).

Figura 6. Mapa de localização e contexto geológico da área garimpeira de alexandrita, em Malacacheta (modificado de Voll & Pimenta 1997).



Esse corpo granítico, sem nenhum indício de metamorfismo, foi datado como brasileiro e apresenta a idade de 537 ± 8 Ma (Basílio 1999), considerada como a idade de cristalização da alexandrita, uma vez que o corpo granítico é a fonte do berílio.

A região apresenta três tipos de depósitos secundários portadores de alexandrita: paleoaluvionar, aluvionar recente e depósito de tálus. Os depósitos paleoaluvionares estão presentes na calha do Ribeirão Setubinha, nos trechos mais encaixados, desde a confluência do Córrego do Fogo até 5km antes da cidade de Setubinha. Os depósitos aluvionares recentes distribuem-se nas quatro drenagens citadas, sendo mais desenvolvidos nas cabeceiras do Córrego do Fogo e ao longo dos ribeirões Santana e Soturno (Figura 6). Um único depósito de tálus foi observado às margens do Córrego do Fogo (Basílio *et al.* 2000).

A base dos depósitos paleoaluvionares do Ribeirão Setubinha está disposta cerca de 5 a 8m acima do nível atual da drenagem. Sobrepostas ao Xisto Capelinha decomposto, estão basicamente duas seqüências, uma superior de composição argilosa e uma inferior, constituída por blocos e seixos rolados. O nível argiloso, representado por latossolo vermelho-amarelado, com espessura

variando de 4 a 8m, mostra-se estruturado pedologicamente. Subjacente a esse nível argiloso, encontra-se, em contato abrupto, a camada de cascalho portadora de alexandrita. Essa camada apresenta uma espessura variável de 1 a 1,5m e se compõe basicamente de seixos e matacões de quartzo, quartzito grosso recristalizado e, localmente, de grandes fragmentos de pegmatito gráfico. Associados a essa fração grossa, preenchendo seus interstícios, ocorrem areia e fragmentos milimétricos a centimétricos de quartzo, além dos cristais de alexandrita.

Os amplos depósitos aluvionares recentes encontram-se nos vales das drenagens e estão sendo reescavados pelos rios atuais. Sua espessura varia muito, situando-se entre 10 e 15m acima do nível atual de drenagem, nos depósitos à montante, até cerca de 1,5m nas partes mais baixas, principalmente do Ribeirão Setubinha. Independentemente da espessura dessa cobertura, a camada mineralizada situa-se, em média, 3m abaixo do lençol freático.

Os alúvios são compostos por níveis centimétricos a métricos de areia de granulometria fina a grossa, em alternância com argila, recobrimdo um nível métrico de cascalho, em que predominam seixos decimétricos de quartzo e quartzito bem arredondados. A alexandrita é encontrada associada ao nível de cascalho. O contato basal dos depósitos aluvionares é feito diretamente com os xistos quartzosos alterados de Formação Capelinha. Na Figura 7, está representado, esquematicamente, o posicionamento do paleoaluvião e do aluvião recente portador da alexandrita.

Figura 7. Representação esquemática do posicionamento do paleoaluvião e do aluvião recente em Malacacheta e Hematita.

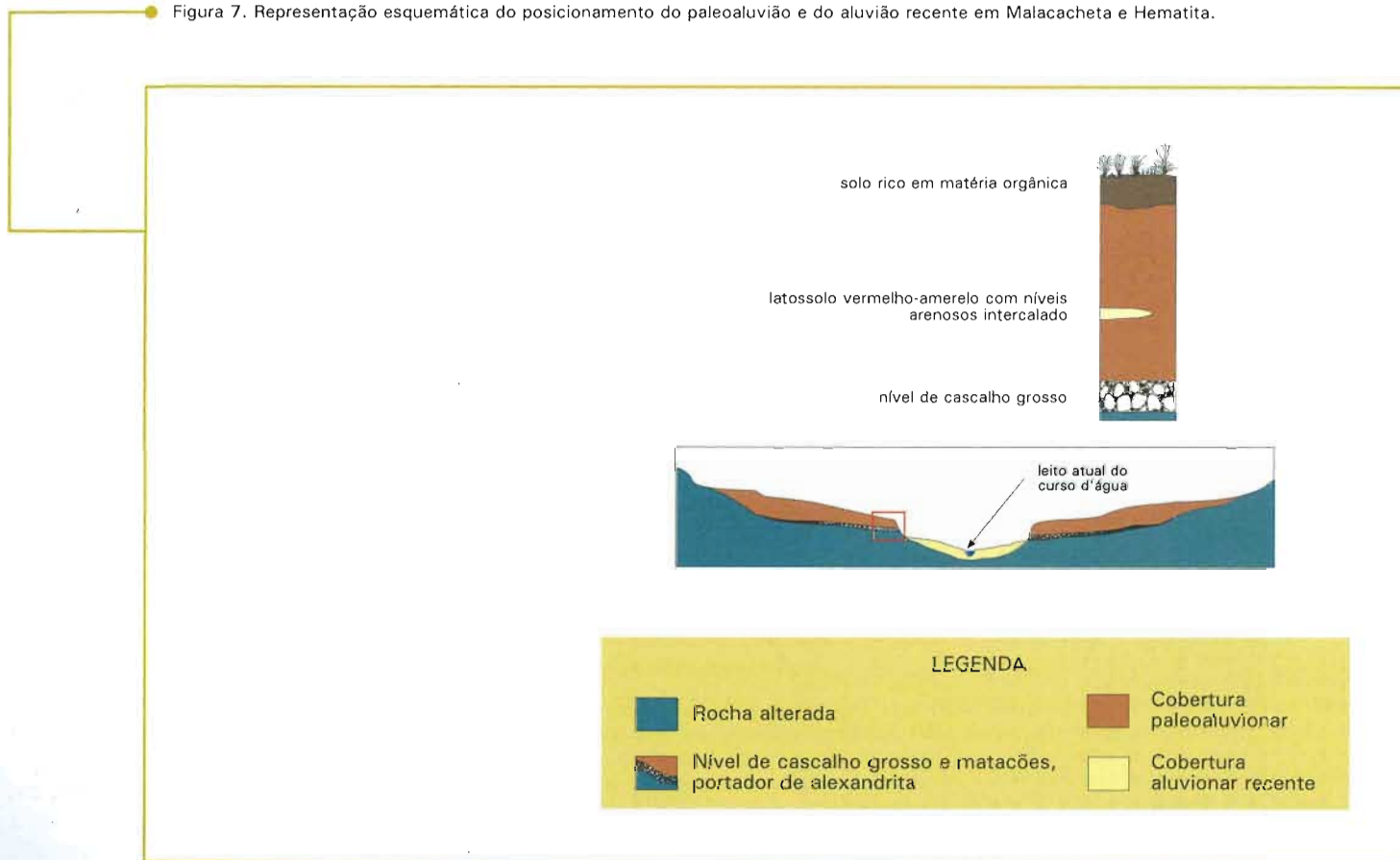




Foto 7. Garimpeiro lavando o cascalho portador de crisoberilo comum e alexandrita. Córrego do Fogo (Malacacheta - MG). (Foto: Márcio Basílio).

Somente um depósito de tálus foi identificado na região dos garimpos. Situa-se à meia encosta, posicionado entre 25 e 30 m acima do leito do Córrego do Fogo, próximo à sua margem esquerda, cerca de 4km antes da confluência com o Ribeirão Setubinha. Esse depósito foi intensamente garimpado e, atualmente, encontra-se abandonado. É composto, essencialmente, por material argiloso a arenoso, que envolve fragmentos angulosos de granito intemperizado. Aparentemente, a fonte do material portador de alexandrita foi completamente erodida, uma vez que o depósito está próximo ao topo atual da elevação e não se observam afloramentos de rocha fresca na sua porção superior.

A alexandrita encontrada em Malacacheta ocorre em fragmentos de tamanho predominantemente milimétricos e, raramente, centimétricos. As cores variam do verde ao azul conhecido no comércio como azul pavão, com tricroísmo distinto de coloração azul, verde intenso e verde amarelado. Faces preservadas são raras, possivelmente devido ao fraturamento intenso sofrido pelos cristais, porém as arestas agudas indicam pequeno transporte.

A Tabela 02 apresenta a composição química média de crisoberilo e alexandrita de Malacacheta (Basílio 1999) e da alexandrita de Hematita (Iwata 2000). Estabelecendo-se uma correlação entre as composições químicas dessas duas jazidas, observa-se que a porcentagem em peso de $\text{FeO}(t)$ é muito mais elevada nas amostras de Hematita do que nas de Malacacheta, mantendo-se acima de 1% nas primeiras. Nas duas jazidas, as análises químicas mostram a evidente participação do cromo na estrutura dos dois tipos de alexandrita estudados. Seu teor é maior nas alexandritas de tonalidade mais vermelha, de Malacacheta, e menor nos espécimes de Hematita, que apresentam efeito óptico de pequena intensidade.

Inclusões fluidas bifásicas e trifásicas são comuns na alexandrita de Malacacheta. Dois tipos de inclusões sólidas foram descritos, um constituído por um mineral fibroso, possivelmente actinolita e, outro, um mineral placóide de hábito hexagonal, provavelmente biotita (Basílio *et al.* 1998c). Além dessas citadas, Henn (1987) identificou inclusões de talco e antofilita, minerais de origem ultramáfica, na alexandrita de Malacacheta.

Não foi possível, até o momento, determinar, com precisão, a rocha hospedeira da mineralização primária da alexandrita de Malacacheta, uma vez que todas as ocorrências encontram-se em ambiente secundário e as rochas da região estão totalmente intemperizadas.

Tabela 2

Composição química média de análises por microsonda eletrônica (% em peso) de crisoberilo e alexandrita de Malacacheta (MAL): (1) crisoberilo simples; (2) crisoberilo verde azulado com zonas de alexandrita; (3) alexandrita com efeito vermelho; (4) alexandrita com efeito violeta (Basílio 1999). Alexandrita de Hematita (HEM): 1, 2, 3 e 4, alexandritas com efeito óptico fraco (Iwata 2000).

	MAL 1	MAL 2	MAL 3	MAL 4	HEM 1	HEM 2	HEM 3	HEM 4
SiO ₂	0,02	0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,04	nd	0,01
TiO ₂	0,26	0,34	0,33	0,29	0,17	0,04	0,14	0,08
Al ₂ O ₃	81,91	81,12	80,90	80,54	77,16	78,12	77,19	76,55
MgO	0,01	0,02	<0,01	0,01	0,01	nd	0,02	nd
CaO	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	nd	nd	0,01	nd
MnO	0,01	0,01	0,01	<0,01	0,02	nd	0,01	nd
FeO(t)	0,48	0,58	0,51	0,53	1,21	1,04	1,19	1,03
BeO*	17,73	17,81	17,81	17,82	21,28	20,58	21,27	22,21
Cr ₂ O ₃	0,02	0,08	0,59	0,65	0,14	0,16	0,15	0,11
Na ₂ O	<0,01	0,01	<0,01	0,012	nd	nd	0,02	0,01
K ₂ O	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	nd	0,02	nd	nd
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

*BeO foi calculado estequiometricamente ($\text{BeO} = \Sigma \text{óxidos} - 100\%$). nd - não determinado

Hematita - Antônio Dias

A alexandrita de Hematita é recuperada de depósitos aluvionares recentes situados nos Córregos Liberdade e Derrubada, que tiveram seu curso desviado. O cascalho que se situa no leito desses córregos é retirado, lavado e peneirado para posterior seleção. Atualmente, a Mineração Itaitinga utiliza tecnologia mais avançada, peneirando o cascalho explotado e separando-o por jigagem. Tal seqüência de técnicas mostra bons resultados, resultando na separação de praticamente 100% da alexandrita.

Os depósitos secundários que ocorrem bordejando o córrego apresentam uma estratificação a partir de um nível xistoso muito alterado e de coloração esverdeada. Sobre essa rocha alterada, ocorre uma camada de cor esbranquiçada, composta predominantemente por caulim, com uma espessura variável entre 20cm e 2m. Sobre o nível caulinizado, existe uma camada de cascalho de granulometria variando de areia a seixo, com espessura de até 1 m, onde é encontrada a alexandrita. Finalmente, sobrepõe-se uma camada superficial argilosa com matéria orgânica, apresentando coloração escura e espessura variável entre 20cm e 2m. Esse nível de matéria orgânica é retirado para o trabalho nas camadas de cascalho portadoras de alexandrita. Atualmente, toda a produção dessa mineração provém do cascalho, no qual, além da alexandrita, são recuperados, subordinadamente, crisoberilo, esmeralda, água-marinha, granada, quartzo e ametista (César-Mendes & Liccardo 2000).



Foto 8. Cata de crisoberilo com nível de cascalho mineralizado na base. Córrego do Fogo (Malacacheta - MG). (Foto: Márcio Basílio).

Foto 9. Catação manual de alexandrita na Mineração Itaitinga, em Hematita (Nova Era-MG). (Foto: Antonio Liccardo).

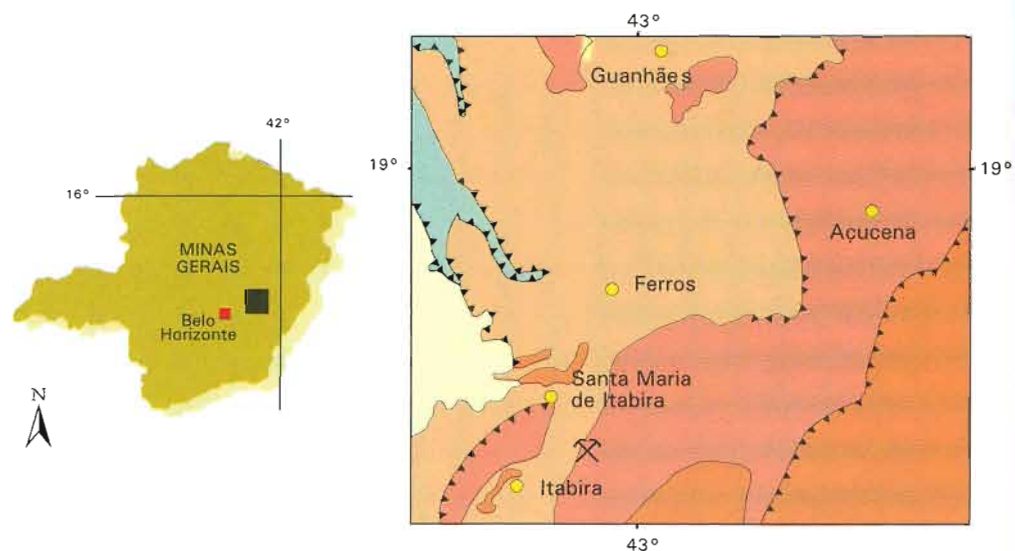


Diferentemente de Malacacheta, em Hematita, trabalhos recentes de pesquisa detectaram a presença de alexandrita no manto de alteração das rochas graníticas proterozóicas. A alexandrita, em cristais recobertos por hidróxido de ferro e manganês, encontra-se associada a níveis metaultramáficos (flogopita/biotita xisto) bordejando pequenos filões pegmatíticos. Essas camadas de flogopita/biotita xisto indicam a ação de alteração metassomática nas rochas ultramáficas (César-Mendes e Liccardo 2000).

Como pode ser observado na Figura 8, a região da jazida está situada no contato entre rochas do embasamento granito-gnáissico indiferenciado, com intercalações de rochas xistosas, e uma intrusão de rochas graníticas do tipo Borrachudos. Nessa mesma figura, observa-se também uma clara associação espacial entre o granito anorogênico alcalino Borrachudos, de idade Mesoproterozóica (~1,7Ga - Dossin *et al.* 1993) e a mineralização de alexandrita.

A correlação entre a idade dos pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental e o granito Borrachudos possivelmente a eles associado é bastante controversa. Dados geocronológicos, obtidos por Bilal *et al.* (1995) em monazita (531(22Ma), e por Marciano *et*

Figura 8. Mapa de localização e do contexto geológico da Mineração Itaitinga (simplificado de Pedrosa-Soares *et al.* 1994).



LEGENDA

- Granitóides Borrachudos: monzogranitos, granitos e sienogranitos foliados
- Granitóides, migmatitos, metamafitos, metaultramafitos e quartzitos indivisos
- Supergrupo Espinhaço: quartzito
- Supergrupo Minas: predominantemente Grupos Itabira e Caraça
- Complexo Mantiqueira: granitóides, gnaisses e migmatitos
- Minas de Alexandrita de Hematita
- Cidades
- Falhas e zonas de cisalhamentos

al. (1994) em moscovita (519 (10Ma), situam o evento de pegmatitização no ciclo Brasileiro. A geração desses pegmatitos portadores de berílio, nessa região de Minas Gerais, se deu, portanto, no ciclo Brasileiro e a granitogênese, no Mesoproterozóico, existindo uma lacuna de ~1,2 Ga entre os dois eventos.

Na área de concessão da Alexandrita Mineração Comércio e Exportação Ltda., situada a Norte e Nordeste da Mineração Itaitinga, grande parte da produção de alexandrita já provém da exploração de rocha *in situ*, ou seja, do manto de alteração oriundo do metassomatismo de rochas xistosas.

A Mineração Itaitinga, trabalhando os depósitos secundários, em uma área legal de mineração com 374 hectares, produz alexandrita de excelente qualidade. A produção é muito pequena para os padrões de mineração e não apresenta uma regularidade. Em abril de 2000, para um volume de 40 m³ de cascalho lavado, a média da produção/dia foi de 12g de mineral-gema, incluindo crisoberilo, alexandrita, ametista e, raramente, esmeralda e água-marinha. Dessa produção, cerca de 55% foi de alexandrita, em geral com boa mudança de cor e o matiz azul pavão na luz do dia.

Apesar do alto percentual de minerais-gemas, a alexandrita de Hematita apresenta fraturas, zonação e inclusões sólidas e fluidas. São bastante freqüentes fraturas preenchidas por hidróxidos de ferro. Zonações na forma de estriações retas e angulares são comuns. Entre as inclusões sólidas, Bank *et al.* (1987) descreveram apatita, fluorita e calcita, enquanto Iwata (2000) citou titanomagnetita, quartzo e anfibólio. Inclusões fluidas secundárias, algumas na forma de cristais negativos, ocorrem alinhadas em planos de fraturas cicatrizados.

Desde 1998, a produção de alexandrita da mineração é lapidada na própria empresa. Nesse período, a maior alexandrita lapidada pesou 2,148 ct (Foto10), apresentando uma notável mudança de cor de verde para vermelho sangue-de-pombo e praticamente isenta de inclusões e de outros defeitos. O aproveitamento médio obtido nessa lapidação é de 35 a 40% do peso do mineral-gema, com a empresa produzindo uma média de 250 ct por mês.



Foto 10. Mudança de cor na alexandrita determinada pela luz incidente: sob luz natural as gemas mostram matiz esverdeado e sob luz incandescente tons avermelhados. A alexandrita maior pesa 2,148 quilates. Mineração Itaitinga, Hematita-MG. (Foto: Antonio Liccardo).

Segundo o proprietário da Mineração Itaitinga, um dos maiores cristais de alexandrita já encontrados em toda a história da empresa pesava 7g, com excelente qualidade gemológica, e foi vendida na forma bruta para o mercado internacional.

O maior comprador é o mercado oriental (principalmente o Japão e a China), absorvendo quase toda a produção dessa mineração. Os preços são bastante variáveis: as pedras mais claras e sem mudança de cor significativa são vendidas a partir de US\$ 70,00/ct. As gemas lapidadas na forma de brilhante e com mais de 2mm são vendidas a partir de US\$ 400,00/ct. Aquelas pesando cerca de 1ct e com mudança de cor do azul pavão para o vermelho sangue-de-pombo custam, aproximadamente US\$ 3.500,00/ct (informações verbais do Sr. Xisto, proprietário da empresa).

Crisoberilo Simples e Olho de Gato

As variedades gemológicas de crisoberilo simples e olho-de-gato produzidas no Estado de Minas Gerais são consideradas como as melhores do mundo. Além de Minas Gerais, que produz crisoberilo nas colorações amarelo, verde amarelado, verde oliva,



Foto 11. Exemplos de crisoberilo: cristal bruto, crisoberilo simples lapidados variedade mel, cabuchões com efeito olho-de-gato. Coleção Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

castanho e, raramente, vermelho. A Bahia e o Espírito Santo também são pequenos produtores. No entanto, o crisoberilo produzido nesses dois últimos estados apresenta baixa qualidade gemológica, sendo muitas vezes leitoso, sem transparência e com o efeito olho-de-gato pouco definido. Os melhores espécimes dessa gema apresentam coloração verde oliva e olho-de-gato com uma faixa muito bem definida e são característicos das jazidas próximas à cidade de Padre Paraíso, que produzem mais de 90% dessa gema no Brasil.

Na região de Padre Paraíso, as principais jazidas e/ou garimpos estão nos depósitos secundários localizados ao longo do Rio Americaninha, Ribeirão Santana e seus afluentes, até encontrar o Rio Preto, na localidade de Rio Pretinho.

Regionalmente, os depósitos de crisoberilo de Padre Paraíso estão inseridos em terrenos graníticos e granodioríticos, sendo os corpos foliados ou não, sin a tardi-tectônicos e intrudidos em gnaisses, granulitos e charnoquitos de idade paleoproterozóica (Pedrosa-Soares *et al.* 1994). Inúmeros corpos pegmatíticos são conhecidos na região.

A maior parte das gemas encontra-se em depósitos de cascalho aluvionares e coluvionares, sotopostos a solos compostos por silte e argila avermelhada e, algumas vezes, acinzentada a preta. Nesses cascalhos mineralizados, o conjunto de minerais comumente associados inclui turmalina preta, berilo azulado e incolor, topázio incolor e azulado, granada, andaluzita e quartzo. A espessura dessas camadas de cascalho normalmente varia de 0,5 a 1,0m, muito semelhante ao que acontece nas jazidas de alexandrita.

Devido ao fato de as rochas dessa região estarem altamente intemperizadas, torna-se difícil a determinação da fonte primária do crisoberilo. A presença de apófises pegmatíticas e a assembléia de minerais típicos desses corpos encontrados junto ao crisoberilo no ambiente secundário sugerem uma correlação genética dessa gema com pegmatitos, seja diretamente ou por meio de metassomatismo das encaixantes.

Bibliografia Consultada

- Bank F.H., Bank H., Gübelin E., Henn, U. 1987. *Alexandrite von einen neuen vorkommern bei Hematita in Minas Gerais, Brasilien. Zeitschrift der deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, 36:121-131.
- Basílio M.S. 1999. A Alexandrita de Malacacheta, Nordeste de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado UFOP, Ouro Preto, 111p.
- Basílio M.S., Pedrosa-Soares A.C., Jordt-Evangelista H. 2000. Depósitos de Alexandrita de Malacacheta, Minas Gerais. *Geonomos*, 8(1,2):47-54.
- Basílio M.S., Dussin I.A., Pedrosa-Soares A.C., Jordt-Evangelista H., Macambira M., Voll E., Pimenta V.B. 1998a. Gênese dos depósitos de alexandrita de Malacacheta, Minas Gerais: evidências geológicas e geocronológicas. In: SBG. Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Anais, 281.
- Basílio M.S., Jordt-Evangelista H., Pedrosa-Soares A.C. 1998b. *Alexandrite aus Malacacheta, Minas Gerais, Brasilien*. In: *Terra Nostra - Geowissenschaftlicher Latinamerika-Kolloquium*, 16, Zusammenfassungem der Tagungsbeiträge, 10.
- Basílio M.S., Pinheiro M.V.B., Jordt-Evangelista H., Pedrosa-Soares A.C., Assunção A.L., Guedes K.J., Krambrock K., Dantas M.M.S. 1998c. Aspectos gemológicos das alexandritas de Malacacheta, MG. In: SBG. Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, Anais, 267.
- Bauer M. 1968. *Precious Stones*. London, Dover Publications Inc., V.II, 627p.
- Bernstein L.R. 1982. *Monazite from North Carolina having the alexandrite effect*. *American Mineralogist*, 67(3):356-359.
- Beus A.A. 1966. *Geochemistry of beryllium and genetic types of beryllium deposits*. San Francisco and London. W.H. Freeman and Company, 401 p.
- Bilal E., Marciano V. R. P. R. O., Fuzikawa K., Correia Neves J. M., Giret A. 1995. Datação de monazitas do Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 8, Diamantina, Anais, SBG, 13: 46-47.
- Bosshart G., Frank E., Hänni H.A., Barot N. 1982. *Blue colour changing kyanite from East Africa*. *Journal of Gemmology*, 18(3):205-212.
- César-Mendes J., Liccardo A. 2000. *The alexandrite mine of Antônio Dias*. In: *31st International Geological Congress - post-congress field trip*, 31, Rio de Janeiro, Brazil, 2000, field trip Aft 20:18-21.
- Dossin I. A., Dossin T. M., Charvet J., Cocherie A., Rossi P. 1993. *Single-zircon dating by step-wise Pb-evaporation of Middle Proterozoic magmatism in the Espinhaço Range, southeastern São Francisco Craton (Minas Gerais, Brazil)*. In: SIMPÓSIO DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993. Anais... SBG, 39-42.
- Farrell E.F., Newnham R.E. 1965. *Crystal-field spectra of chrysoberyl, alexandrite, peridot, and sinhalite*. *American Mineralogist*, 50:1972-1981.
- Farrell E.F., Fang J.H., Newnham R.E. 1963. *Refinement of the chrysoberyl structure*. *American Mineralogist*, 48:804-810.
- Franz G., Morteani G. 1984. *The formation of chrysoberyl in metamorphosed pegmatites*. *Journal of Petrology*, 25(1):27-52.
- Franz G., Gilg H.A., Grundmann G., Morteani G. 1996. *Metassomatism at a granitic pegmatite - dunit contact in Galicia: the Franqueira occurrence of chrysoberyl (alexandrite), emerald, and phenakite: discussion*. *Canadian Mineralogist*, 34:1329-1331.
- Fritsch E.; Rossman G.R. 1987. *An update on color in gems. Part 1: introduction and colors caused by dispersed metal ions*. *Gems e Gemology*, 23(3):126-139.
- Gübellin E., Schmetzer K. 1982. *Gemstones with alexandrite effect*. *Gems & Gemology*, 18(4):197-203.
- Hassan F., El-Rakhawy A. 1974. *Chromium III centers in sythetic alexandrite*. *American Mineralogist*, 59:159-165.
- Heinrich E.W., Buchi S.H. 1969. *Beryl-chrysoberyl-sillimanite paragenesis in pegmatites*. *Indian Mineralogist*, 10:1-7.
- Henn U. 1995. *Edelsteinkundliches Praktikum*. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, 44(4):3-112.
- Henn U. 1987. *Inclusions in yellow chrysoberyl and alexandrite*. *Australian Gemmologist*, 16(6):217-220.
- Iwata S.A. 2000. Aspectos Genéticos e características mineralógicas do crisoberilo das lavras de Esmeraldas de Ferros e Hematita. USP, São Paulo, Tese de doutoramento. 131p.
- Kammerling R.C., Johonson M.L.; Liu Y. 1996. *An examination of colour change sapphires from Tanzania*. *The Australian Gemmologist*, 19(6):255-258.
- Klein C., Hurlbut Jr. C.S. 1993. *Manual of Mineralogy (after James D. Dana) 21st ed*. John Wiley & Sons, 681p.
- Laskovenkov A.F., Zhernikov V.I. 1995. *An update on the Ural emerald mines*. *Gems & Gemology*, 31(2):106-113.

- Liu Y., Shigley J.E., Halvorsen A. 1999. *Colour hue change of a gem tourmaline from the Uмба Valley, Tanzania. Journal of Gemmology*, 26(6):386-396.
- Marciano V. R. P. R. O., Javier Rios F., Achtschin A. B., Correia Neves J. M., Svisero D.P. 1994. Berilos de pegmatitos de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais - Brasil. *Geonomos*, 2:41-50.
- Martin-Izard A., Paniagua A., Moreiras D., Acevedo R.D., Marcos-Pascual C. 1996. *Metassomatism at a granitic pegmatite - dunit contact in Galicia: the Franqueira occurrence of chrysoberyl (alexandrite), emerald, and phenakite: replay. Canadian Mineralogist*, 34:1332-1336.
- Munasinghe T., Dissanayake C.B. 1981. *The origin of gemstones of Sri Lanka. Econ. Geol.*, 76:1216-1225.
- Nassau K. 1983. *The physics and the chemistry of color. New York. John Wiley e Sons*, 454p.
- Palache C., Berman, H., Frondel C. 1944. *Dana's System of Mineralogy: Vol 1: elements, sulfides, sulfosalts., oxides. John Wiley & Sons, New York, 7th ed.*, 834p.
- Pedrosa-Soares A.C., Dardene M.A.; Hasui Y., Castro F.D.C., Carvalho M.V.A. 1994. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Companhia Mineradora de Minas Gerais (COMIG), Belo Horizonte, Escala 1:1.000.000.
- Pinheiro M.V.B., Basílio M.S., Krambrock K., Dantas M.S.S., Paniago R., Assunção A. L., Pedrosa-Soares A.C. 2000. The cause of color of the blue alexandrites from Malacacheta, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Gemmology*, 27(3):161-170
- Poole C.P.Jr. 1964. *The optical spectra and color of chromium containing solids. Journal of Physic and Chememistry of Solids*, 25:1169-1182.
- Proctor K. 1988. *Chrysoberyl and alexandrite from pegmatite districts of Minas Gerais, Brazil. Gems & Gemology*, 24(1):16-32.
- Schmetzer K., Gübelin E. 1980. *Alexandrite-like natural spinel from Sri Lanka. N. Jb. Miner. Abh.*, 9:428-432.
- Schmetzer K., Bank H., Gübelin E. 1980. *The alexandrite effect in minerals: chrysoberyl, garnet, corundum, fluorite. N. Jb. Miner. Abh.*, 138(2):147-164.
- Soman K., Nair N.G.K. 1985. *Genesis of chrysoberyl in the pegmatites of southern Kerala, India. Mineralogical Magazine*, 49(5):733-738.
- Stalder H.A.; Embrey P., Graeser S., Nowacki I.W. 1978. *Die Mineralien des Binntales. Naturhistorisches Museum, Bern.*
- Tröger W.E. 1971. *Optische Bestmmung der gesteinsbildenen Minerale. Teil 1 Bestmmungstabellen. E. Scheizerbart'sche Verlagsbuchhadlung. Stuttgart*, 188p.
- Ustinov V.I., Chizhik O.Ye. 1994. *Sequential nature of the formation of emerald and alexandrite in micaite-type deposits. Geochemistry International*, 31(7):115-118.
- Voll E., Pimenta V.B. 1997. Mapeamento geológico da área garimpeira de alexandrita entre Setubinha e Malacacheta - MG. UFMG, Trabalho Geológico de Graduação, Belo Horizonte, 52 p.
- Walling J.C., Jenssen H.P., Morris R.C., O'Dell E.W., Peterson O.G. 1979. *Tunable-laser performance in BeAl₂O₄:Cr³⁺. Opt. Lett.* 4:182-183.
- Webster R.F.C.A. 1975. *Gems - their sources, descriptions and identification. 3ed Edition, London, London Newnes, Butterworths.* 1026 p.
- White W.B., Roy R.R., Crichton J.M. 1967. *The 'alexandrite effect': an optical study. American Mineralogist*, 52:861-871.

capítulo dez



Quartzo
Maurício Favacho

I n t r o d u ç ã o

Minas Gerais tornou-se uma região mundialmente famosa, em grande parte devido às variedades de gemas e de minerais raros espalhados por suas diversas regiões. No entanto, as principais variedades coloridas de quartzo, isto é, ametista (cor violeta), citrino (cores amarelo e laranja), quartzo *fumê* e *morion* (variedade cinza escura ou preta), devido ao fato de se apresentarem, na maioria das vezes, com cores fracas, eram tidas como material de baixa qualidade gemológica. Atualmente, com o advento dos tratamentos térmicos e irradiações em gemas, visando a mudanças ou ao melhoramento da cor, esse cenário começa a mudar e o quartzo passa a ser visto como uma das principais matérias-primas para lapidadores e comerciantes de gemas em geral, pois trata-se de um material abundante no Estado, de baixo preço, e tratamento considerado relativamente fácil.

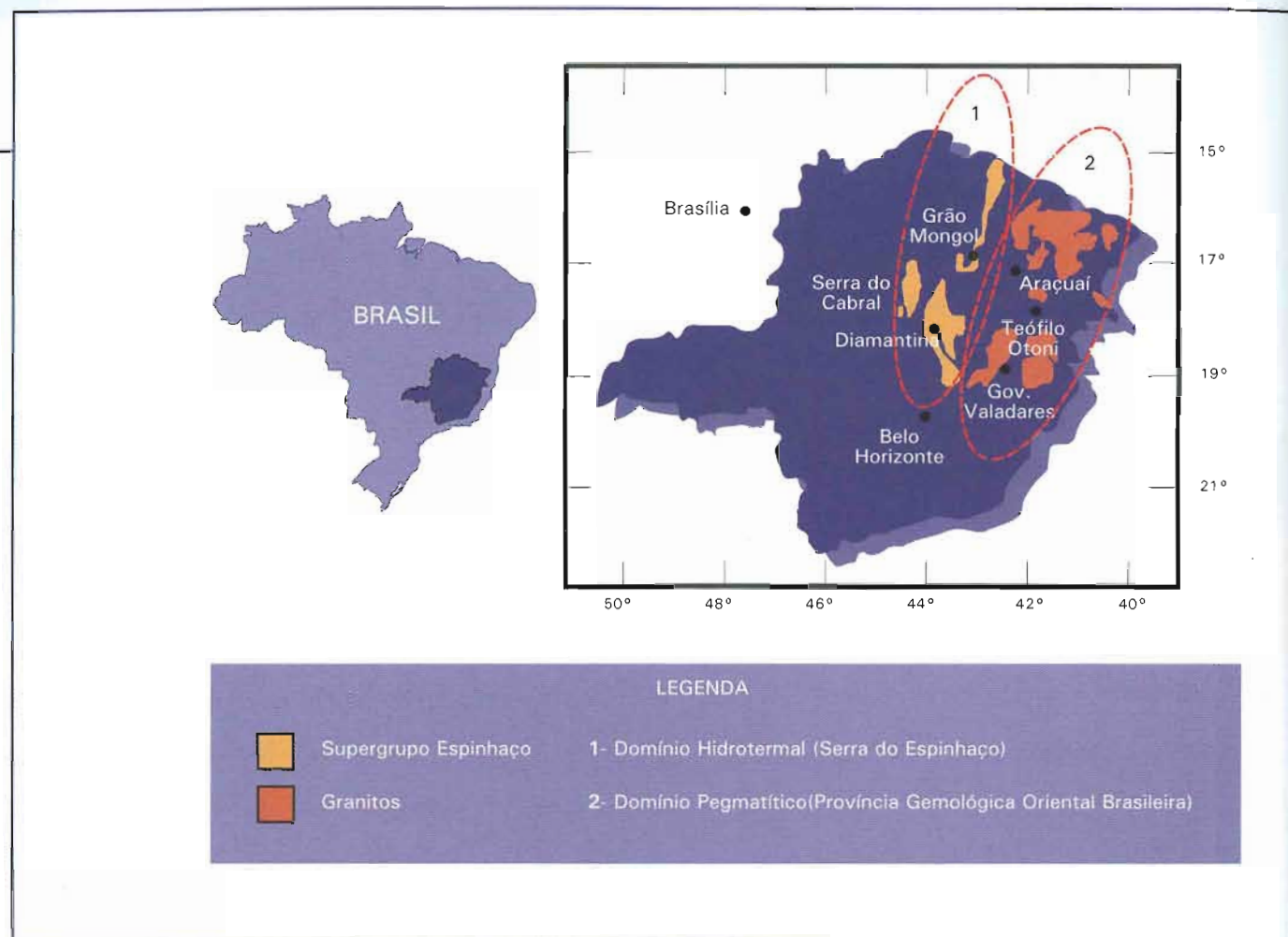
A recente aceitação de gemas tratadas deu início à busca de 'fórmulas' para o melhoramento ou total mudança da cor em quartzos provenientes de diversas regiões do Estado de Minas Gerais e também de Estados vizinhos. Nomes comerciais como *green gold*, *cognac*, *beer*, *whiskey*, *olive*, *lemon*, *pineapple* (Figura 1) começaram a surgir para o produto irradiado.

Empresas do setor comercial de gemas, com sede nas cidades de Belo Horizonte, Teófilo Otoni e Governador Valadares, atuam de forma a tornar viável o quartzo gemológico de Minas Gerais, que possui grande aceitação comercial devido à boa estabilidade de cor e da impossibilidade de a gema tornar-se radioativa.

Uma outra modalidade de quartzo gemológico existente em Minas Gerais são os quartzos, considerados espécimes de coleção. Geralmente são vendidos em estado bruto em feiras de gemas ou exportados para o acervo de museus de mineralogia de outros países, como por exemplo: os quartzo gigantes da região de Araçuaí; os quartzos *laser* da região de Diamantina; as drusas de quartzo róseo de Governador Valadares; os quartzos geminados, igreçados e biterminados da região de Batatal e Sopa (Diamantina); o quartzo 'jacaré' da região do Taquaral (Itinga), entre outros, que, em menor escala, também agregam valores.

Minas Gerais apresenta uma das maiores reservas de quartzo gemológico do mundo em quartzos beneficiáveis por tratamentos térmicos e irradiações Gama e minerais de coleção. Tais depósitos encontram-se distribuídos, principalmente, na Serra do Espinhaço e na Província Pegmatítica Oriental Brasileira, denominada, nesse livro, de Província Gemológica Oriental Brasileira (Figura 2). A exploração adequada desses depósitos, aliada ao beneficiamento de suas gemas em território brasileiro, certamente contribuirá para manter constante a produção e agregar mais valores a Minas Gerais.

Figura 1. Principais domínios geológicos em que são encontrados depósitos de quartzo em Minas Gerais - a Serra do Espinhaço (domínio de quartzos de veios hidrotermais) e a Província Gemológica Oriental do Brasil (domínio de quartzo de veios pegmatíticos).

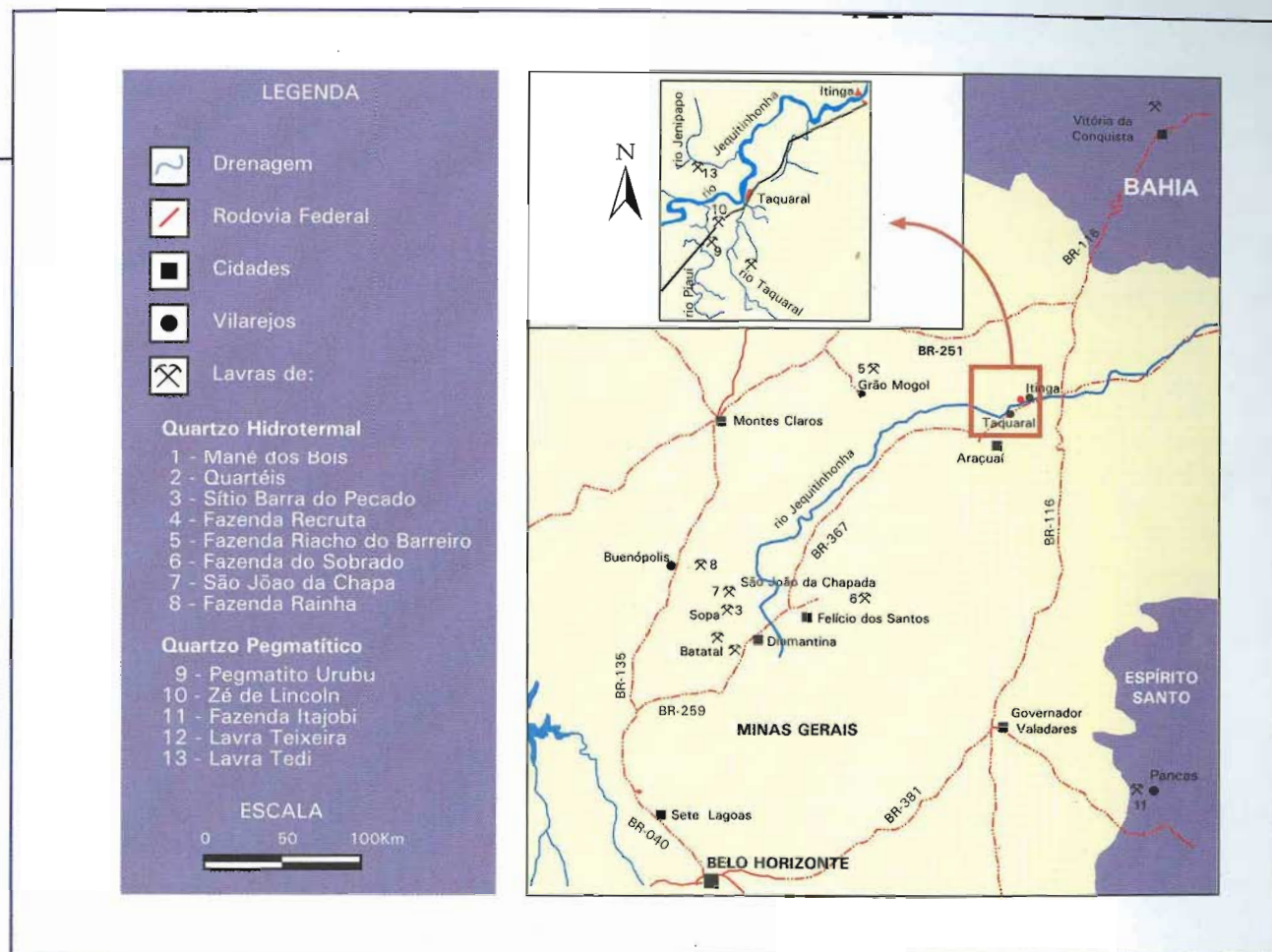


Histórico

Dentre os autores que fizeram importantes relatos sobre a geologia dos depósitos, mineralogia e produção de quartzo para fins óptico e gemológico em Minas Gerais, destacam-se:

Renger (1979), que estabelece, primeiramente, a gênese de origem hidrotermal dos veios de quartzo leitoso do Espinhaço Meridional; Carvalho (1982), que apresenta um enfoque maior sobre a geologia e gênese das mineralizações de quartzo no Espinhaço Meridional, descrevendo um zonamento para os veios de grandes dimensões; Cassedanne & Roditi (1991), que caracterizam a tipologia dos depósitos de quartzo róseo maciço e cristalino existentes no Brasil, em particular os do Campo Pegmatítico de Governador

Figura 2. Localização de alguns depósitos de quartzo gemológico presentes na Serra do Espinhaço e na Província Gemológica Oriental do Brasil.



Valadares, enfatizando que essa ocorrência é exclusiva dos veios de origem pegmatítica; César-Mendes *et al.* (1998), que descrevem uma grande jazida de ametista, na Serra do Sudário, Zona da Mata, de caráter hidrotermal, classificando-a como possuidora de qualidade gemológica semelhante à famosa ametista de Pau d'Arco; Chaves *et al.* (1999), que sintetizaram a tipologia dos depósitos de quartzo com qualidade gemológica, em quatro ambientes principais: veios hidrotermais, veios pegmatíticos; cavidades em basaltos, e depósitos secundários. Nesses diversos ambientes, podem ser encontrados as variedades hialina, ametista, citrino, rósea, *fumê*, *morion* e um raro espécime de coloração azulada.

Moraes (1937), que relata a aplicabilidade do quartzo hialino da região do Espinhaço na indústria óptica; Scorza (1946), o qual resalta sua aplicabilidade na confecção de peças ornamentais e de adorno; a Companhia Ligas de Alumínio S. A., que, em 1972, inicia a produção de silício metálico, utilizando como matéria-prima o quartzo leitoso lavrado em regiões de Gouveia e Curvelo, até novembro de 1976; Karfunkel *et al.* (1998), que relatam ocorrência de ametistas no Espinhaço Central, principalmente na região de Grão Mogol. A ametista de Grão Mogol, como ficou conhecida, é um dos espécimes mais curiosos cientificamente, pois a sua cor violeta possui uma grande foto-

instabilidade, fazendo com que, em poucos dias ocorra seu desbotamento quase total. Também se destacam, Kahwage (2000), que ressalta a existência de um citrino, na região de Itinga, cuja cor pode ser melhorada por irradiação e tratamento térmico; Favacho-Silva (2000), que ressalta a importância dos tratamentos em quartzos incolores e levemente coloridos existentes nos depósitos de Minas Gerais, sugerindo a irradiação Gama e o subsequente tratamento térmico como os principais processos de melhoramento de cor nesse mineral.

Este capítulo configura-se como uma contribuição para o conhecimento sobre a geologia dos depósitos, mineralogia e produção de quartzo para fins ópticos e gemológicos em Minas Gerais.

R e g i õ e s P r o d u t o r a s e s u a s P r i n c i p a i s L a v r a s

Os principais depósitos de quartzos hialino e coloridos do Estado de Minas Gerais que possuem qualidade gemológica encontram-se inseridos em dois grandes contextos geológicos: a Serra do Espinhaço, com domínio de quartzos de origem hidrotermal, e a Província Gemológica Oriental Brasileira, com domínio de quartzos de origem pegmatítica (vide Figura 1).

A Figura 2 apresenta a localização de alguns depósitos de quartzo da Serra do Espinhaço e algumas lavras inseridas na Província Gemológica Oriental, em destaque para a região de Itinga-Araçuai, Nordeste de Minas Gerais.

S e r r a d o E s p i n h a ç o

As maiores jazidas de veios hidrotermais em Minas Gerais ocorrem na Serra do Espinhaço, encaixadas em rocha como filitos e quartzitos do Supergrupo Espinhaço.

Entre as ocorrências já registradas no domínio hidrotermal, podemos destacar: a ametista da Fazenda Sobrado (Felício dos Santos), de coloração muito acentuada; o citrino claro de veios nas proximidades de Diamantina; o morion, na Fazenda Recruta (Vitória da Conquista, Bahia), que se encontra atualmente paralisada; a ametista de Montezuma, típica por seus cristais que se tornam verdes após aquecidos (prasiolita); os cristais incomuns de ametista da Fazenda Riacho do Barreiro (Grão Mogol), que desbotam em poucos dias; os quartzos *fumê* e morion de Sopa (Diamantina); e os quartzos hialinos da lavra da Fazenda Rainha, Buenópolis, que, após tratamento, transformam-se em ametistas.

P r o v í n c i a G e m o l ó g i c a O r i e n t a l B r a s i l e i r a

Na Província Gemológica Oriental Brasileira, citrinos ocorrem amplamente, próximo de Taquaral; ametista escura, pouco comum, aparece principalmente em alguns depósitos perto de Teófilo Otoni e em Pancas (Espírito Santo), e quartzo róseo ocorre em várias lavras, principalmente na região de Itinga, como nas de Laranjeira e da Ilha.

Essas variedades ocorrem exclusivamente em pegmatitos (Cassedanne & Roditi 1991), normalmente em massas leitosas disseminadas no núcleo do pegmatito, ou mais raramente como drusas de cristais muito reduzidos, preenchendo caldeirões. Nesse ambiente, também são comuns as variedades de quartzo incolor que culminam no aparecimento de citrinos amarelo-esverdeados (*green-gold*) e laranja-amarronzados, como em São José da Safira.

A região de Itinga é considerada uma das mais importantes áreas de exploração de quartzo gemológico da província. Nessa área, existem três focos principais de ocorrência: no vale do rio Piauí, as lavras do Pegmatito Urubu e do Zé de Lincoln; na região do rio Jenipapo, as lavras do Teixeira e do Tedi; e a SSW de Itinga, que apresenta quartzos hialinos de diferentes dimensões e minerais de coleção como o quartzo 'jacaré' (vide Figura 2, destaque).



Geologia e Gênese dos Depósitos

225

A região Sul do Brasil (Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina) e parte do Uruguai apresentam quartzo com qualidade gemológica, principalmente ametistas associadas a geodos. Em Minas Gerais e outros Estados brasileiros, e que não houve derrames vulcânicos, as variedades coloridas de quartzo estão principalmente relacionadas aos ambientes de veios pegmatíticos e veios hidrotermais. Por outro lado, ocorrências de variedades levemente coloridas ou incolores que aceitem tratamentos por irradiação e tratamentos térmicos também têm sido notificadas em depósitos secundários. De fato, aluviões e coluviões de diversas regiões de Minas Gerais constituem um tipo de depósito intensamente procurado por geólogos, gemólogos e garimpeiros, devido ao valor comercial do material produzido.

Os depósitos de quartzo gemológico apresentam-se em quatro ambientes geológicos principais: veios hidrotermais; pegmatitos graníticos; cavidades em basalto; e aluviões e coluviões. Em tais ambientes, encontram-se as variedades hialina, ametista, citrino, róseo, azul, *fumê* e *morion* (Chaves *et al.* 1999).

Veios Hidrotermais

Os veios hidrotermais de quartzos coloridos do Espinhaço Meridional e Central encontram-se inseridos principalmente em quartzitos e filitos do Supergrupo Espinhaço. São veios de dimensões métricas até quilométricas que ocorrem praticamente em toda a região. São caracterizados por formas irregulares, tamanhos variados e aspecto leitoso. São gerados em zonas de baixa solubilidade de sílica, em que a temperatura não ultrapassa 300°C. Ocorre um zonamento definido, composto por quatro zonas: de borda, correspondente a quartzitos bastante fraturados e parcialmente recristalizados; brechóide, formada principalmente por fragmentos de quartzitos; maciça, constituída por quartzo branco leitoso pouco fraturado; cristalina, correspondente à porção central do veio, com cristais hialinos centimétricos e bem formados, dispersos em bolsões de até 40cm de diâmetro.



Foto 1. Cristal de ametista de origem hidrotermal (Itabira - MG). (Foto: Antônio Liccardo).

Os veios de menor porte são maciços, constituídos essencialmente de quartzo leitoso, nos quais apenas os veios mais potentes apresentam quartzo perfeitamente hialino, o qual pode vir a ser tratado por irradiação e tratamento térmico

Nas bordas da Serra do Espinhaço, normalmente a garimpagem de quartzo hialino ocorre em depósitos coluvionares e aluvionares, indo até a parte eluvial e, finalmente, no próprio veio. Esse material pode adquirir cores após tratamentos adequados. Assim, os depósitos coluvionares da Serra do Espinhaço constituem a mais nova fonte de ametistas com qualidades gemológicas de Minas Gerais.

P e g m a t i t o s G r a n í t i c o s

Os pegmatitos graníticos do Nordeste do Estado caracterizam-se pela presença de uma ampla variedade de minerais gemológicos e de coleção. Estão inseridos no distrito pegmatítico de Araçuaí, mais precisamente no campo pegmatítico de Itinga, que se estende nas zonas metamórficas de baixa pressão e alta temperatura (Costa 1987), no extremo Nordeste do domínio estrutural Araçuaí-Minas Novas (Pedrosa-Soares 1995). As rochas hospedeiras são, principalmente, cordierita-biotita xistos da Formação Salinas. As principais lavras descritas do campo de Itinga são: lavras do Pegmatito Urubu e Zé de Lincoln, localizadas nas proximidades do rio Piauí; lavra Teixeira, na região do Taquaral; e lavra do Tedi, na área do rio Jenipapo (Figura 2, destaque).

Os pegmatitos do campo de Itinga estão associados a granitos alcalinos gerados por fusão crustal (granitos tipo-S), tardi a pós-tectônicos. São enriquecidos em elementos como o Li, Be, F, entre outros elementos raros, que facilitam o aparecimento de um amplo espectro de gemas. Esses pegmatitos apresentam, normalmente, quatro zonas internas: de borda, mural, intermediária, e núcleo (vide Capítulo 1). O quartzo encontra-se preferencialmente no núcleo deles, em grande volume, porém de baixa qualidade gemológica. Seu beneficiamento ou aplicabilidade prática está relacionado ao tratamento de melhoramento de gemas, de modo a agregar a ele valor comercial.



Foto 2. Quartzo "jacaré" ou "jacarezado" típico de certas áreas da Província Pegmatítica Oriental Brasileira. O cristal apresenta duas fases de cristalização, uma leitosa e outra *fumê*. (Foto: Maurício Favacho).

C a v i d a d e s P r e e n c h i d a s e m B a s a l t o s

Ametista e ágata ocorrem em geodos, preenchendo cavidades em basalto da região de Monte Alegre de Minas (Triângulo Mineiro). Aparentemente são depósitos similares às famosas jazidas de ametista/ágata do Rio Grande do Sul, ainda que muito mais restritas.



Foto3. Drusa mostrando cristais de quartzo oblato, típicas de algumas regiões da Serra do Espinhaço. (Foto: Maurício Favacho).

Foto4. Quartzo "igrejado" ou "barracado", feição formada pela intersecção das linhas de crescimento do cristal. (Foto: Maurício Favacho).



Aluviões e Coluviões

Depósitos aluvionares e coluvionares de quartzo são pouco comuns em Minas Gerais. Em Batatal, Diamantina, o quartzo hialino é explotado em coluviões adjacentes a morrotes quartzíticos. Nesses últimos, são típicas as *flashstones*, em que os cristais de quartzo mostram sulcos originados pela ação de raios. Em garimpos aluvionares de diamante, são freqüentes os achados de seixos de quartzo hialino ou amarelado, comercializados para lapidação. Em Buenópolis, quartzos hialinos presentes em depósitos coluvionares, atualmente em lavra, podem ser tratados por irradiação, transformando-se em ametistas.

Minerais de Coleção

O alto valor comercial dos cristais de quartzo de Minas Gerais não se deve apenas às variedades de gemas. Uma fatia do mercado pouco ressaltada, mas que agrega grandes valores aos cofres das cidades de Diamantina, Corinto, Araçuaí, Teófilo Otoni e Governador Valadares, é o comércio de minerais de coleção com hábitos diferentes ou incomuns, que ocorrem caracteristicamente em diversas regiões de Minas Gerais.

Entre essas cristas, devido aos seus hábitos incomuns, destacam-se:

- biterminados: combinação de romboedros positivos e negativos que, muitas vezes, são desenvolvidos de maneira tão igual a ponto de culminarem na formação de uma bipirâmide hexagonal;
- quartzos *laser*: desenvolvem-se abruptamente ao longo do eixo **c** como uma grande barra e ocorrerem isoladamente ou como drusas. O quartzo *laser* é um dos que se destacam, pois são bastante apreciados por colecionadores e estão expostos nas principais feiras de gemas do mundo inteiro, como em Tucson (Arizona, EUA), Idar-Obstain (Alemanha) e Teófilo Otoni (Brasil). Em Minas Gerais, os cristais de quartzo *laser* são comuns nas lavras do Espinhaço Meridional;
- cristais prismáticos comuns: ocorrem isolados, com pequenas dimensões, comumente conhecidos por 'dentes-de-cão' ou 'polegares' (*thumbnail specimens*);
- Quartzo igrejaado ou barracado: cristais comuns com linhas de crescimento que descrevem feições geométricas. Ocorrem em diversas regiões da Serra do Espinhaço Meridional, como na área de Batatal, Diamantina. Tal material é um dos objetos mais procurados por colecionadores ;
- Quartzo *phantom* ou quartzo fantasma: com aspecto leitoso;
- Quartzos oblatos: cristais com achatamento dos eixos **c** ou **a**. Comuns em certas regiões da Serra do Espinhaço;
- quartzo jacaré: apresenta duas fases de cristalização, leitosa e *fumê*, com figuras de dissolução ou corrosão, possivelmente associadas a uma diferença composicional de uma mesma solução. A fase *fumê* apresenta cristais menores, indicando que a sua cristalização ocorreu em temperaturas menores do que a leitosa. Tais cristais são extremamente apreciados por colecionadores.



Foto5. Cristais isolados de quartzo *fumê* comumente conhecidos como "dentes-de-cão" ou "polegares" (*thumbnail*). (Foto: Maurício Favacho).

A Origem da Cor

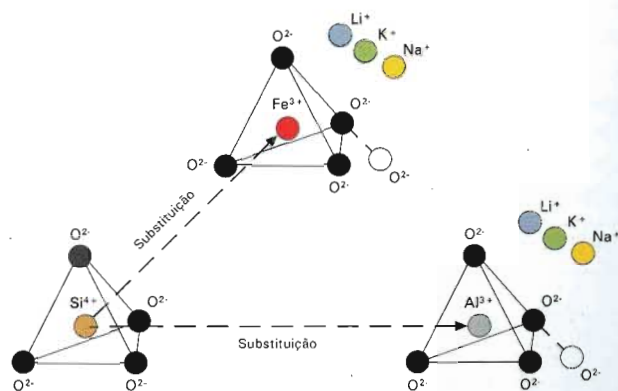
A aquisição da cor em quartzo está intimamente ligada ao problema da substituição do silício por íons Al^{3+} e Fe . Essa substituição, por sua vez, gera um desequilíbrio eletrônico devido à diferença entre suas valências (Figura 3). Assim que o desequilíbrio é instalado, ocorre um rápido restabelecimento do equilíbrio por íons monovalentes, como Li^+ , Na^+ , K^+ e H^+ , que atuam como compensadores eletrônicos (Rossman 1994).

Os estudos de elementos menores como o lítio, sódio, potássio e hidrogênio, como elementos influenciadores na cor das variedades gemológicas de quartzo são extremamente recentes, pois, no passado, apenas se conheciam as influências do ferro e do alumínio. O alumínio, em geral, é encontrado com valores menores que 13 ppm até 15000 ppm (Smith in Steele 1984). O ferro ocorre em torno de 350 ppm. Segundo Dennem (1966), o conteúdo de Li^+ , Na^+ e K^+ é proporcional ao conteúdo $\text{Fe} + \text{Al}$, enquanto que análises quantitativas de H^+ somente podem ser feitas quando houver $(\text{OH})^-$ ou água molecular internamente no mineral.

O conteúdo de impurezas contido dentro dos cristais depende amplamente do ambiente de cristalização do quartzo, daí a necessidade de se fazer uma correlação entre as variedades coloridas desse mineral com o seu ambiente de crescimento.

O sódio e o potássio encontram-se principalmente relacionados às causas de cores em quartzos sintéticos, ao passo que o lítio e o hidrogênio são os principais elementos que, juntamente com o ferro e o alumínio, darão origem às variedades naturais, como ametistas, citrinos e quartzos *fumê* (Rossman 1994).

Figura 3. Principais impurezas responsáveis pela coloração do quartzo.



Ametista

A ametista é a variedade violeta de α -quartzo, cuja cor desenvolve-se apenas em espécimes contendo ferro. Entretanto, a presença de ferro não é suficiente para o desenvolvimento da cor da ametista. Em 1906, Berthelot reconheceu que o desenvolvimento da cor da ametista está associado à radiação ionizante. A cor da ametista é destruída por calor, porém pode ser restaurada por radiação ionizante, se o calor não for excessivo. Relatos científicos mostram que a cor encontra-se associada a uma transferência de carga entre o Fe^{3+} e o O^{2-} , o que favorece o aparecimento de um íon incomum de Fe^{4+} que seria o principal responsável pela cor da ametista (Lehmann 1976).

Citrino

O citrino é uma variedade de quartzo cujas cores variam de amarelo a laranja, podendo chegar até tons laranja-amarronzados. Embora o citrino ocorra naturalmente em Minas Gerais, atualmente grande parte dos citrinos disponíveis são produzidos por tratamentos que envolvem irradiação gama. Nesse material, um defeito na estrutura do mineral conhecido como centro de cor parece ser a principal causa de cor (Maschmeyer & Lehmann 1983).

A discussão sobre a causa de cor em citrinos é complicada, devido ao fato de que um número de cores, como o amarelo, o amarelo-esverdeado, e tons laranja-amarronzados, ser produzido no quartzo por irradiação (natural ou artificial). A irradiação pode ser um importante fator tanto em cristais coloridos naturalmente, desde que o quartzo possa receber doses maiores de radiação a partir do decaimento de ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , e seus produtos filhos, como também nos coloridos artificialmente. Uma excelente e ilustrada revisão referente à origem da cor em citrinos e métodos usados para distinguir entre as várias origens da cor foi apresentada por Schmetzer (1989).

Quartzo Fumê

As variedades muito escuras ou mesmo pretas são chamadas de *morion*. O *fumê* se descolora a temperaturas entre $140\text{--}400^\circ\text{C}$. Sua cor está principalmente relacionada à radiação natural em quartzos com impurezas de alumínio e lítio em sua estrutura. Por intermédio da combinação de irradiação e tratamento térmico, alguns cristais de Minas Gerais tornam-se laranja-amarronzados, principalmente os da região da Província Gemológica Oriental Brasileira. A origem de sua cor está relacionada a um defeito na sua estrutura cristalina, conhecido como centro de cor. Quanto a sua estabilidade, pode-se dizer que as amostras provenientes da Serra do Espinhaço têm maior estabilidade do que as provenientes da Província Gemológica Oriental Brasileira.

O modelo mostrado na Figura 4 representa o centro de cor fumê, que primeiramente foi esboçado por O'Brien e Pryce (1955), e desenvolvido em detalhe por O'Brien (1955) baseado em ressonância paramagnética eletrônica de quartzos *fumê* irradiados com raios-X. A Figura 4(a) apresenta a estrutura ideal do quartzo sem impurezas, enquanto a 4(b) mostra o alumínio substituindo alguns íons de silício. Devido à diferença de valência entre esses elementos, ocorre o desequilíbrio eletrônico, o qual é compensado pela entrada de íons compensadores de carga, representados, na figura, pelo Li^+ e H^+ . Na irradiação, um elétron não emparelhado, localizado num orbital de um átomo de oxigênio próximo a um átomo de alumínio, desloca-se criando um defeito na estrutura cristalina do quartzo, possivelmente voltando a recarregar o átomo compensador inicial. Essa configuração final é conhecida como o centro de cor que culmina no aparecimento do *fumê*.

Figura 4. a) Molécula de SiO_2 (Quartzo incolor) antes da irradiação, b) Depois da irradiação, nos locais onde o Si^{4+} é substituído pelo Al^{3+} . Existe um desequilíbrio eletrônico (falta de uma carga positiva) em que o restabelecimento ocorre com a retirada de um elétron (Fonte: Adaptado de Nassau, 1984).

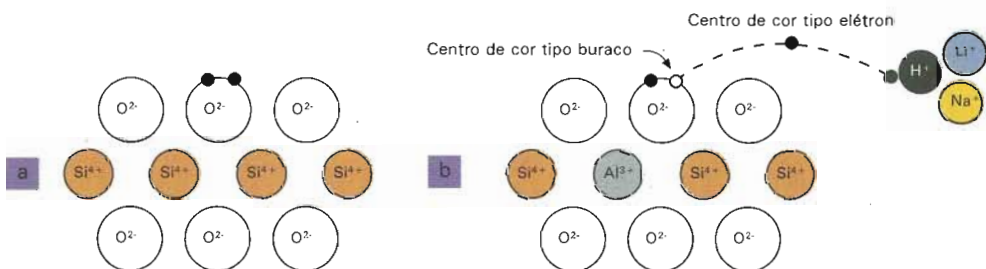




Foto 6. Cristais de gema lapidada de quartzo *fumê* (Guanhães - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

Q u a r t z o . V e r d e P r o d u z i d o p o r I r r a d i a ç ã o

Tons verde-amarelados resultam quando o quartzo é irradiado. Essa cor incomum é proveniente de três processos: (1) irradiação de quartzos incolores por raios Gama; (2) irradiação de quartzo incolor até tornar-se *fumê* seguido por tratamentos térmico a temperaturas relativamente baixas entre 150-250°C ou (3) tratamento térmico de quartzo *fumê* natural a baixas temperaturas. São José da Safira destaca-se na produção desse tipo de quartzo, comercialmente conhecido como *green-gold*.

Os cristais que se tornam verde-amarelados são caracterizados por alto conteúdo de Al^{3+} , H^+ e Li^+ e pertencem, exclusivamente, à Província Gemológica Oriental Brasileira (Favacho-Silva 2000). No entanto, Lehmann (1971) reconheceu, primariamente, que o quartzo verde-amarelado poderia ser obtido a partir da irradiação de quartzos naturais com alto conteúdo de Al e H.

A influência da presença de OH e H_2O na causa de cor de quartzos é pouco ou quase nada conhecida (Rossman 1994).

C o n c l u s õ e s

Minas Gerais contribui com cerca de 25% do total da produção mundial de gemas. No entanto, a exportação de jóias tipicamente brasileiras com as variedades ametistas, citrino e quartzo *fumê*, juntamente com as demais gemas tradicionais mineiras, como topázios, turmalinas, esmeraldas, etc., não chega a ocupar 5% dentro do mercado brasileiro e, mundialmente, essa produção é irrisória.

No setor de gemas e jóias, Minas Gerais agrega pouco valor às suas gemas porque atua, principalmente, como simples fornecedor para outros países. Isso significa dizer que as gemas do Estado, quando exportadas isoladamente em bruto, pouco contribuem para a economia estadual. Assim sendo, a sua indústria de gemas e jóias de Minas Gerais só poderá participar ativamente do mercado externo caso sejam criadas condições adequadas para o aumento de sua competitividade, congregando esforços para se beneficiarem internamente metais e gemas.

Segundo dados da EMBRARAD - Empresa Brasileira de Radiações LTDA, apenas com o tratamento por irradiação Gama, o quartzo é capaz de gerar valores da ordem de milhões de dólares. Para se ter uma idéia, após esse tratamento, o quartzo sozinho agrega um valor de aproximadamente 400% sobre o valor original de uma gema de cor fraca ou incolor.



No Estado de Minas Gerais, são raros as ametistas que possuem o violeta intenso, porém em determinadas regiões da Serra do Espinhaço, mais precisamente nos arredores das cidades de Buenópolis e Corinto, identificou-se a existência de espécimes de quartzo incolor que, depois de tratados adequadamente, adquirem a cor violeta típica da ametista. Trata-se, na maioria das vezes, de um material que é encontrado sob a forma de seixos arredondados que variam de 1 a 8cm de diâmetro e que, após lapidado, apresentam quilatagem que varia de 10 a 70 quilates, o que significa um aproveitamento de aproximadamente 90% a partir do material bruto. De acordo com os dados obtidos, o quilo desse material na lavra é de cerca de 300 dólares americanos e seu tratamento por irradiação Gama não ultrapassa os 60 dólares. Vale ressaltar que o tratamento térmico dessa ametista pode causar o desaparecimento da cor violeta a aproximadamente 400°C, não passando pelo citrino como ocorre em ametistas de outras regiões brasileiras.

Em se tratando de citrinos, grande parte do material disponível no mercado de gemas era oriundo de aquecimento da ametista de Pau d'Arco (PA) ou do Rio Grande do Sul e Uruguai, já que não existem grandes reservas naturais dessa variedade colorida de quartzo no Brasil. No entanto, em tempos recentes, grandes quantidades de quartzo totalmente incolores que, após tratamento, adquirem a cor amarela ou laranja, típicas de citrinos, proveniente principalmente de depósitos mineiros, abastecem o comércio de gemas nacional e internacional.

Quartzos amarelo-esverdeados lançados no mercado de gemas com o nome de quartzo *green-gold*, *lemon* e *olive* resultantes da irradiação de cristais ou lascas incolores de regiões de Minas Gerais, como São José da Safira, são também considerados citrinos. Vale ressaltar a existência de espécimes de quartzo *fumê* que, após tratamento térmico, dão origem a um citrino de cor laranja amarronzado. O quartzo *fumê* pode ser obtido de irradiações em quartzo incolor, pois em determinados centros comerciais, as variedades ametistas e citrinos são produtos superiores ao quartzo *fumê*.

O quartzo possui uma ampla variedade de forma e tamanhos. Devido a essa característica, passou a ser objeto de colecionadores de minerais gemológicos, bem como também alvo de misticismo.

O quartzo de coleção tem atraído dezenas de compradores e colecionadores a Minas Gerais, mais precisamente para as regiões de Diamantina, Araçuaí, Governador Valadares e Teófilo Otoni. Grande parte desse material é exposto em museus de mineralogia do mundo inteiro ou vai ser objeto de venda nas grandes feiras como a de Tucson, no Arizona. Quartzos gigantes, tipo *laser* e drusas chegam a custar muito mais do que as gemas mais famosas. Vale ressaltar que não existe um critério de classificação e avaliação de peças de coleção, e por isso, o possuidor pode pedir qualquer valor.



Foto 7. Gemas lapidadas de quartzo com inclusões, comercialmente conhecidas por lodolita, dendrite e rutilado. Coleção de Kalil Elawar. (Foto: Antonio Liccardo).

Bibliografia Consultada

- Carvalho A S. 1982. Geologia e Gênese das mineralizações de quartzo no Espinhaço Meridional, Minas Gerais-Brasil. Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de mestrado, 127p.
- Cassedanne, J.P. & Cassedanne, J.O. 1973. Black quartz from Vitoria da Conquista, Brazil. Mineralogical Record, 4:264-266.
- Cassedanne J.P. & Roditi M. 1991. Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil. Journal of Gemmology, 22:273-286.
- Cerny P. 1982. Anatomy and classification of granitic pegmatites. In: Cerny, P. ed. Granitic Pegmatites in Science and Industry. Mac Short Course Handbook, 8:37.
- César-Mendes J., Scheller T., Costa W. 1998. As ametistas da Serra do Sudário. In: SBG-MG, Congr. Bras. de Geol., XL, Belo Horizonte, Anais, p256.
- Chaves M.L.S.C. 1997. Geologia e Mineralogia do diamante da Serra do Espinhaço. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de doutoramento.
- Chaves M.L.S.C., Karfunkel J., Quémeneu J., Addad J. 1997. Depósitos de quartzo da região de Batatal (Diamantina, MG). In: SBG-MG, Simp. Geol. de Minas Gerais, XL, Diamantina, Anais, 14:103-104.
- Chaves M.L.S.C., Brito W., Favacho-Silva M.D. 1999. Tipologia dos depósitos de quartzo gemológico em Minas Gerais e regiões adjacentes. In: SBG-MG, Simp. Geol. de Minas Gerais e Centro-Oeste, Anais.
- Costa A G. 1987. Petrologie und geochemische untersuchungen des gneiss-migmatit-gebiets von Itinga, Jequitinhonha Tal, Nordöstliches Minas Gerais Brasilien. Universidade de Clausthal, Alemanha, Tese de Doutorado, 287p.
- Favacho-Silva, M.D. 2000. Variedades gemológicas de quartzo em Minas Gerais: Geologia, mineralogia, causas de cor, técnicas de tratamento e aspectos mercadológicos. Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de mestrado, 155p.
- Guzzo P.L., Iwasaki F., Iwasaki H. 1997. Al-related centers in relation to γ -irradiation (Response in natural quartz). Phys. Chem. Miner. 24:254-263.
- Kahwage M.A. 2000. Minerais Gemológicos da Região de Araçuaí-Itinga (Mg): Modo de Ocorrência, Características e Métodos de Beneficiamento. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de mestrado, 133p.
- Karfunkel J., Quemeneur, J., Chaves, M.L.S.C., Banko A., Lameiras, F.S., Pinheiro, M.V.B., Pfannes H.D. 1998. A ametista de Grão Mogol (MG): ocorrência, descrição e métodos de tratamento. In: SBG-MG, Cong. Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, Anais, p263.
- Maschmeyer D., Lehmann G. 1983. New hole centers in natural quartz. Phys. Chem. Min. 10:84-88.
- Moraes L.J. 1937. Geologia econômica do norte de Minas Gerais. Rio de Janeiro. DNPM/SFPM Bol. 19, 132p.
- Nassau K. 1983. The Physics and Chemistry of Color. The Fifteen Causes of Color. New York, John Wiley & Sons.
- Nassau K. 1984. Gemstone Enhancement. London, Butterworths. Stoneham.
- O'Brien M.C.M. 1955. The structure of the colour centers in smoky quartz. Proc Royal Soc., A(231):404-414.
- O'Brien M.C.M. & Pryce M.H.L. 1955. Paramagnetic resonance in irradiated diamond and quartz: interpretation. In: Effects in Crystalline Solids: report of the conference on defects in crystalline solids. The Physical Society, London, p.88-91.
- Pedrosa-Soares A C., Wiedemann C., Fernandes M.L.S., Faria L.F., Ferreira J.C.H. 1997. Geotectonic significance of the Neoproterozoic granitic magmatism in the Araçuaí Belt, Eastern Brazil: a model and pertinent questions. Rev. Bras. Geoc., Vol. Especial do II ISGAM.
- Renger F. 1979. Evolução dos conceitos geológicos da Serra do Espinhaço. In: SBG-MG, Simp. Geol. Minas Gerais, 1, Diamantina, Anais... (1): 9-28.
- Rossmann G.R. 1994. Colored varieties of the silica minerals. Reviews in mineralogy. Mineralogical Society of America, 29:433-467.
- Schmetzer K. 1989. Methods for the distinction of natural and synthetic citrine and prasiolite. Journal of Gemmology, 21:368-391.
- Scorza E P (1946) Quartzo na Serra do Cabral, Estado de Minas Gerais, Brasil. In: Anais do II Congresso Panamericano de Engenharia de Minas e Geologia, Petrópolis, vol 3, p210.
- Empresa Brasileira de Radiações - EMBRARAD.



capítulo onze

Corín don

Antonio Liccardo
Hanna Jordt Evangelista

I n t r o d u ç ã o

Considerado o mineral gemológico mais importante após o diamante, o coríndon é pouco conhecido no Brasil, apesar de uma tradição milenar de produção em outros lugares do mundo. Até há alguns anos, ocorrências de coríndon eram relativamente raras, mas hoje têm sido registrados novos depósitos em diversos países. Essa abundância de depósitos, contudo, não reflete necessariamente uma produção de gemas com qualidade - estima-se que apenas 1% do coríndon minerado em todo o globo seja aproveitável gemologicamente.

Ocorrências dispersas de coríndon nas suas variedades gemológicas, ou seja, rubi ou safiras, são noticiadas no panorama minerário brasileiro há décadas sem que, no entanto, essas gemas tenham obtido destaque, ora devido à produção reduzida, ora em virtude de baixa qualidade para o mercado de gemas. Recentemente, porém, com a natural evolução do conhecimento geológico e do nível de informação a respeito do subsolo nacional, têm surgido novas ocorrências que apresentam grande potencial para modificação desse quadro.

A presença de rubi ou safira de boa qualidade no território nacional reveste-se de particular importância, à medida que essas gemas, somadas às outras famosas gemas brasileiras, colocam o país em posição de destaque mundial como Província Gemológica.

O Mineral

Coríndon

A palavra 'coríndon' tem sua origem incerta, podendo ter sido derivada de várias línguas, como o hindu, *kurand*; o sânscrito, *kuruvinda*; o tamil, *kurundam*, ou, ainda, do telegu, *kuruvindam* (Hughes, 1990).

O coríndon apresenta duas variedades gemológicas denominadas rubi, do latim *rubeus*, vermelho; e safira, do grego, azul. Essa classificação surgiu em meados de 1800, quando, a partir de artigos publicados em Londres, reconheceu-se o parentesco dessas gemas, até então consideradas minerais diferentes.

Rubis e safiras são citados ao longo da história em inúmeros textos. Na escola grega, Teophrastus, em 315 a.C., já agrupava as gemas de acordo com a coloração, tendo incluído o rubi, junto com o espinélio e a granada vermelhos, na classificação de carbúnculo, do latim *carbunculus*, carvão pequeno. Quase todo o conhecimento sobre gemas dessa época, no Oriente Médio e região mediterrânea, era baseado nos estudos de Teophrastus e Plínio, 'o Velho', que escreveu o Tratado das Pedras Preciosas. Esse conhecimento antigo, entretanto, devido à diferença de coloração entre rubis e safiras, que não se sabia que eram o mesmo mineral, deve ser tomado com cautela.

Tradicionalmente, a proveniência do coríndon gemológico tem sido a Ásia, com grande importância histórico-cultural em países como a Índia e Ceilão. Os romanos ampliaram o conhecimento dos gregos antigos acerca das pedras preciosas. Após a queda do Império Romano e com a difusão do cristianismo na Idade Média, houve pouco desenvolvimento nas ciências em geral, inclusive na mineralogia, já que toda a ênfase era dada ao conhecimento religioso no mundo ocidental; assim as informações dessa época são derivadas principalmente dos árabes.

Por volta de 1200 a 1500 d.C., com as viagens dos europeus à Ásia e África, recomeça a surgir o interesse pelas gemas dessas regiões. No Renascimento, Alselm Boetius de Boot (1636) publica, em Hannover, o *Gemmarvm et Lapidum Historia*, considerada por



Foto 1. Rubis e safiras provenientes de Palmeiras (Manhuaçu - MG). A gema facetada maior pesa 0,60 quilates. (Foto: Antônio Licardo).

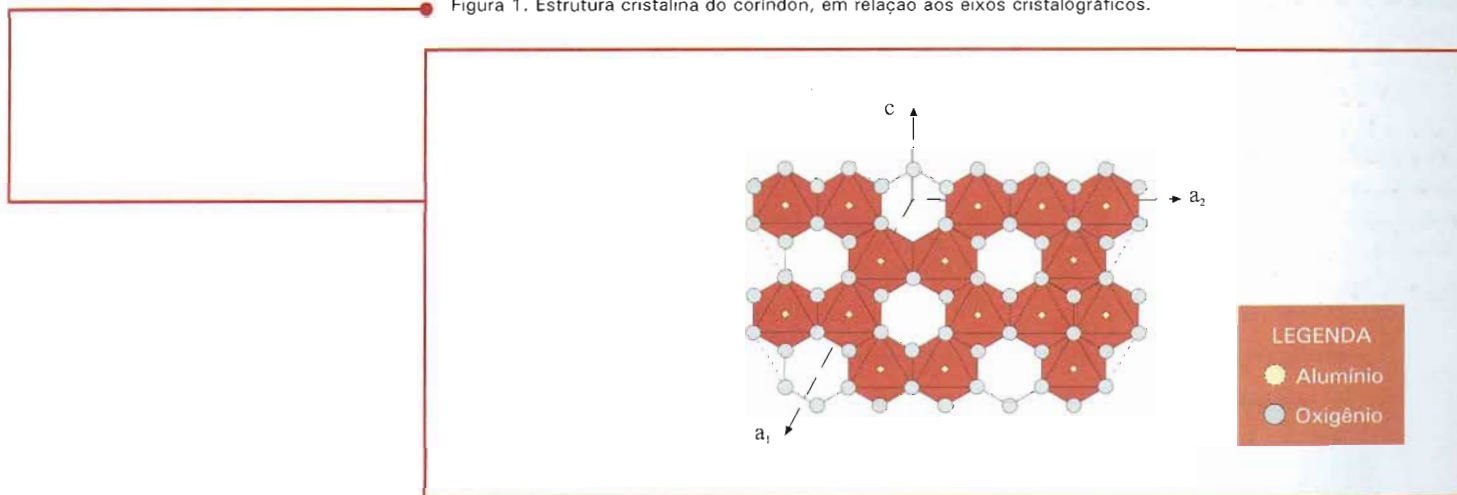
muitos a mais importante obra sobre gemas do século XVII. Nessa obra, o autor descreve o rubi como carbúnculo e cita sua proveniência como sendo da Índia e Arábia. Encontra-se a primeira citação da hipótese de 'pedras' vermelhas não serem a mesma gema. Isso foi extremamente importante, já que, mais tarde, descobriu-se que granadas, espinélios e rubis são de espécies minerais completamente diferentes.

Mineralogia e Cristalografia

O coríndon é um óxido de alumínio, de fórmula Al_2O_3 , cujas variedades gemológicas rubi e safira são definidas unicamente pela coloração: quando vermelho, trata-se de um rubi e outras colorações, safiras. O termo safira normalmente é acompanhado da coloração da gema (por exemplo, safira amarela) e, quando não há referência à cor, subentende-se que é safira azul.

Na estrutura do coríndon (Al_2O_3), o alumínio e o oxigênio combinam-se do mesmo modo que na hematita (Fe_2O_3) e na ilmenita (FeTiO_3). Esse conjunto de minerais, cuja razão metal/oxigênio é X_2O_3 , denomina-se Grupo da Hematita. Na estrutura cristalina, os oxigênios estão dispostos em um arranjo espacial aproximadamente hexagonal; o alumínio está ligado a seis oxigênios em coordenação octaédrica, porém apenas 2/3 das posições disponíveis encontram-se ocupadas pelo alumínio (Figura 1).

Figura 1. Estrutura cristalina do coríndon, em relação aos eixos cristalográficos.



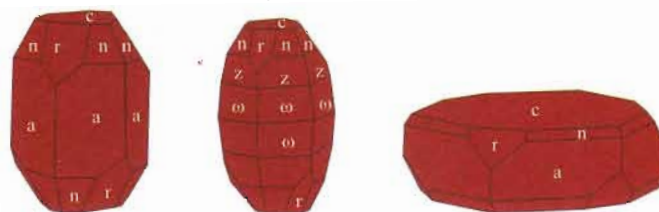
O coríndon cristaliza-se na subdivisão trigonal do sistema hexagonal, classe ditrigonal escalenoédrica $\bar{3}2/m$, com os seguintes elementos de simetria:

- Um eixo ternário.
- Três eixos binários perpendiculares aos eixos ternários.
- Três planos de simetria perpendiculares aos eixos binários e interceptando-se nos eixos ternários.
- Um centro de simetria.

Para essa classe de simetria, existem sete formas simples: Pinacóide basal (0001), prismas hexagonais ($10\bar{1}0$ e $10\bar{2}0$), prismas dihexagonais ($h k \bar{1}0$), romboedros ($10\bar{1}1$ e $10\bar{2}0$), bipirâmide hexagonal ($h h \bar{2} h l$) e escalenoedro ditrigonal ($h k \bar{1}1$) positivo e ($k h \bar{1}1$) negativo.

Os cristais de coríndon podem apresentar hábitos muito variados, dependendo da variedade, da procedência e de outros fatores genéticos. Os cristais de rubi são comumente diferentes dos de safira. Os rubis da Birmânia, por exemplo, costumam cristalizar-se em

Figura 2. Cristais de coríndon mostrando as formas fundamentais desse mineral: (c) pinacóide basal, (r) romboedro, (n, z, w) bipirâmides hexagonais e (a) prisma hexagonal. A figura central mostra o típico hábito em forma de barrilete do coríndon.



prismas hexagonais que terminam em ambas as extremidades por plano basal perpendicular às faces do prisma, com faces romboédricas mais ou menos desenvolvidas nos ângulos alternados. As faces romboédricas podem desaparecer quase por completo nos rubis da Tanzânia ou Madagascar. As safiras costumam se apresentar sob a forma de bipirâmide ditrigonal com doze faces triangulares, seis superiores e seis inferiores. Muitas vezes, os vértices da bipirâmide são truncados por pinacóide.

O coríndon não possui clivagem, embora seja comum o aparecimento de uma partição associada a planos de geminação polissintética. A partição reflete a reação do mineral a pressões externas. O resultado da partição é exatamente o mesmo da clivagem, sendo, no entanto, devido a defeitos estruturais induzidos pela deformação da estrutura cristalina. Em 1979, White (*in* Hughes, 1990) estudando coríndon de várias localidades, descobriu que, nesses planos, muitas vezes se detectava a presença de outro mineral identificado como boehmita ($\text{AlO}(\text{OH})$).



Foto 2. Prospecção de coríndon aluvionar na região de Palmeiras (Manhuaçu - MG). (Foto: Antonio Licardo).



O coríndon é especial quando se trata de dureza, pois é o segundo mineral mais duro na escala de Mohs (dureza 9). Esse é um dos fatores determinantes para a utilização gemológica de um mineral, já que é uma das características responsáveis pela durabilidade da gema e, no caso de rubis e safiras, é uma das justificativas para o destaque que tais gemas alcançam.

A dureza é, geralmente, uma propriedade anisotrópica que pode variar significativamente conforme a direção cristalográfica. No coríndon, o plano basal apresenta dureza menor, a qual aumenta nos planos prismáticos. Para o parâmetro densidade, atribui-se o valor de 3,989 para a safira incolor (coríndon puro) enquanto que para rubi e safira azul é de aproximadamente 3,997, com variações para as diversas localidades de origem. As safiras verdes e azuis (mais ricas em ferro) da Austrália e da Tailândia podem chegar a 4,02. Os índices de refração em coríndon variam pouco, em geral em torno de 1,7606 para o raio extraordinário e 1,7687 para o raio ordinário, conforme a localidade de origem. A birrefringência costuma ser relativamente constante, entre 0,008 e 0,009. O ferro contido nas gemas como elemento-traço aparece como causa principal de variação nesses índices. Assim, coríndon rico em ferro, como as safiras amarelas, verdes e azuis, tendem a apresentar índices de refração mais altos.

Modelos Genéticos

A formação do coríndon acontece em ambientes ricos em alumínio e deficientes em sílica, sendo que essa segunda situação reflete-se na ausência de quartzo nas rochas portadoras desse mineral (Figura 3). Uma das reações de formação de coríndon no metamorfismo progressivo é a partir do diásporo:

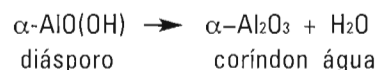
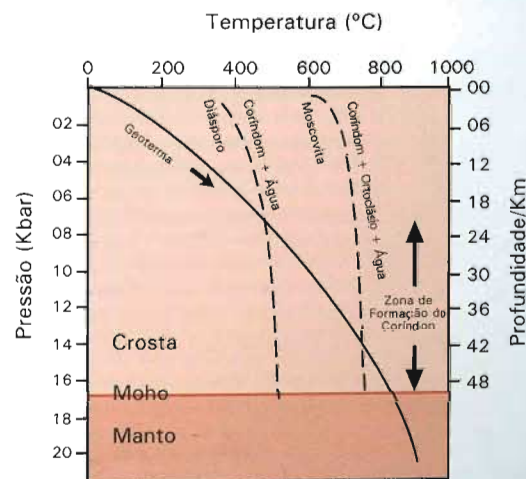


Figura 3. Gráfico indicativo das condições de pressão e temperatura para a formação do coríndon a partir de hidróxido de alumínio (diásporo) ou da moscovita (Levinson & Cook 1994).



O limite máximo de estabilidade do coríndon é definido pelo ponto de fusão do mineral, ou seja, 2045°C.

O significado da expressão 'ambiente rico em alumínio' não pode ser considerado como absoluto, mas deve, outrossim, ser definido em relação aos cátions associados e à estabilidade das paragêneses minerais, portanto, com grau metamórfico. Deve-se levar em consideração que, somente em casos excepcionais, o Al pode ser introduzido na rocha, já que sua mobilidade é muito baixa. No âmbito do metamorfismo, pirofilita, polimorfos de Al_2SiO_5 (cianita, sillimanita e andaluzita), mica branca, granada ou cordierita incorporam qualquer excesso de Al na presença de teores mais elevados de sílica. Caso houver excesso de Mg ou Fe junto com Al, forma-se espinélio, quando o grau metamórfico for muito alto. Portanto, coríndon só pode formar-se no caso de haver excesso de Al em relação à sílica, mas também em relação a magnésio e ferro.

O coríndon ocorre como mineral magmático somente em rochas de composição anômala. No entanto, entre alguns dos depósitos de coríndon no mundo, encontram-se seis ocorrências em basaltos alcalinos, cuja gênese é ainda polêmica.

A formação de coríndon pode ser explicada basicamente pelos seguintes processos geológicos: metamorfismo regional, metamorfismo de contato e magmatismo básico (Quadro 1).

Quadro 1 Representação esquemática das possíveis origens do coríndon.

Origem	Mecanismo	Protólito ou tipo
Metamórfica	Metamorfismo regional (incluindo anatexia)	Bauxitas e lateritas Paleossolos e sedimentos pelíticos Bauxitas cársticas/antibolitos
	Metamorfismo de contato	Isoquímico (termal) Aloquímico (metassomático)
Ígnea	Magmatismo básico	Sienitos e similares Basaltos alcalinos

Metamorfismo Regional

Nesta seção, estão agrupadas as ocorrências de coríndon geradas por processos metamórficos *stricto sensu* em função dos diferentes tipos de protólitos.

Metamorfismo de bauxitas e lateritas

A reação que explica a formação do coríndon, como ocorre na ilha de Naxos, na Grécia, formando os famosos depósitos de esmeril, é:

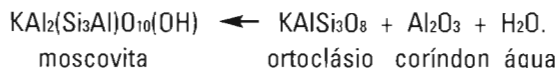


No metamorfismo regional, as condições de formação do coríndon às custas da decomposição do diásporo são de aproximadamente 500°C e pressões acima de 7,5kbar. Em temperaturas superiores a 750°C, o mineral reagente passa a ser a moscovita (Figura 3). Diásporo, além de gibbsita e boehmita, são sugeridos como material primário para a formação de rubi em Mogok, na Birmânia (Kammerling *et al.* 1994 *in* Levinson & Cook 1994).

Óxidos de alumínio hidratados são típicos de terrenos lateríticos e com bauxita, como em grandes áreas da Índia, África, Austrália e outras regiões tropicais.

Metamorfismo de paleossolos

Rochas sedimentares ricas em alumínio (pelitos que contêm tipicamente minerais aluminosos, como caulinita) são submetidas a um aumento progressivo de temperatura e pressão. Nas novas condições de ambiente, a caulinita se converte em moscovita. Coríndon, junto de K-feldspato e água, é produto da transformação da moscovita em temperaturas superiores a cerca de 750°C (Figura 3), conforme a reação:



Essa reação ocorre na ausência de quartzo, pois, caso contrário, outro aluminossilicato, por exemplo, cianita, forma-se em lugar do coríndon. Estudos experimentais revelaram que a decomposição da moscovita ocorre em um largo campo de pressão, numa estreita faixa de temperatura como é mostrado na Figura 3. Essa figura apresenta, também, a faixa de temperatura e pressão de formação do coríndon por metamorfismo da crosta que vai de cerca de 500°C a 750°C e cerca de 7,5 a 17 kbar (≈ 22 até 50 km de profundidade, considerando-se uma geoterma continental de 12°C/km).

Rapasinghe & Dissanayake (1985) propõem, para toda a região de charnoquitos dos Highlands no Sri Lanka, que os efeitos do metamorfismo de fácies granulito em sedimentos muito aluminosos representam um importante papel na formação dos depósitos de coríndon dessa região e que cinturões de granulitos metassedimentares, produzidos por colisão de placas, são ambientes geológicos propícios para a formação desse mineral-gema.

A propósito dos estudos nos terrenos granulíticos do Sri Lanka, é interessante a observação de Munasinghe & Dissanayake (1981) que traçam um comparativo entre essas litologias e os cinturões granulíticos metassedimentares do Brasil, evidenciando similaridades na história geológica e no potencial para geração de coríndon.

Metamorfismo de bauxitas cársticas e margas

Caracterizados por Ca, Mg e Al elevados - é um dos principais mecanismos de formação de coríndon encontrado em mármore dolomíticos. A mais famosa jazida de rubi no mundo, Mogok, na Birmânia (Mianmar), enquadra-se nesse contexto.

Anatexia

Ainda durante o metamorfismo regional, pode ocorrer anatexia, um processo de fusão parcial que pode ocorrer em condições de temperatura de $\pm 700^\circ\text{C}$ e 7,7 kbar de pressão (para uma atividade $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$) em sistemas ricos em Na (Greiff 1994). A fusão gerada é rica em álcalis e sílica, com a formação de restitos com coríndon, por exemplo, a ocorrência em Ngorongoro, na Tanzânia.

Metamorfismo de Contato

Metamorfismo de contato termal (isoquímico)

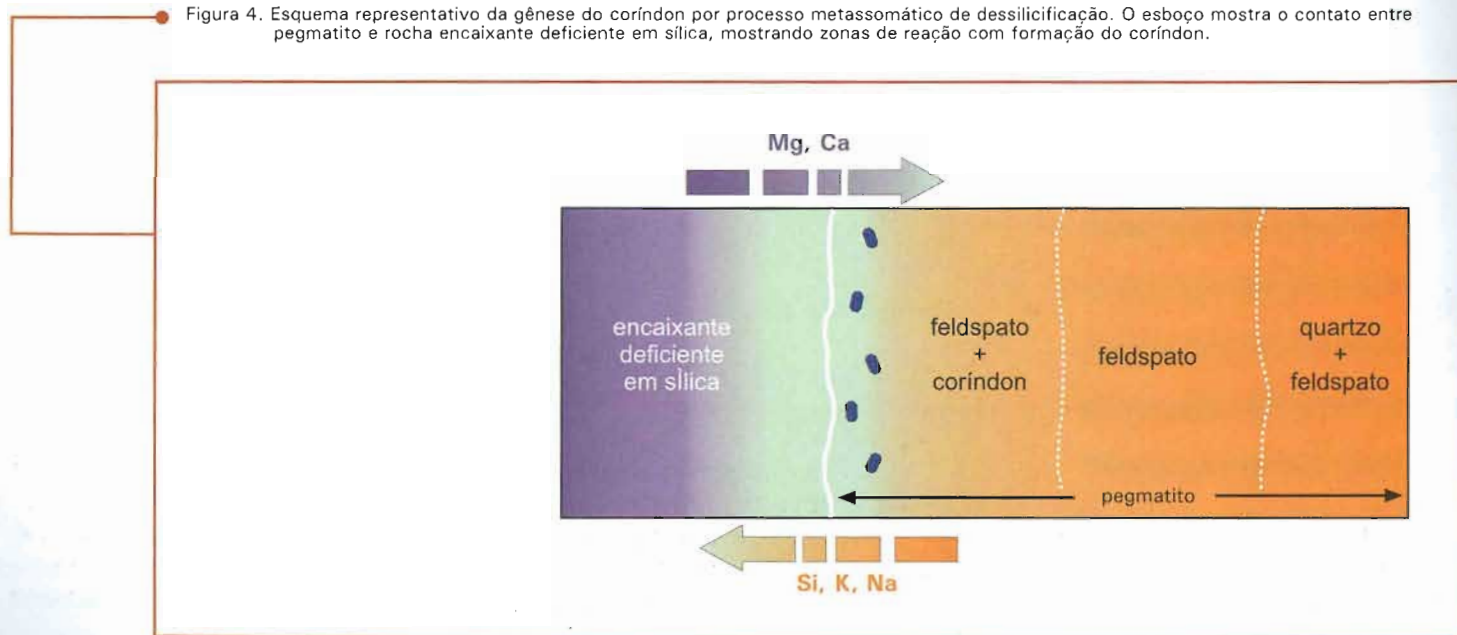
O coríndon pode se formar nas auréolas de contato adjacentes a uma intrusão, isto é, nos *hornfels* ricos em Al e pobres em sílica. No entanto, ele também pode aparecer disseminado na própria rocha magmática, se ela incorporar fragmentos de encaixantes pobres em Si e ricos em Al. As ocorrências no Vietnã, Tailândia, Camboja e Austrália em álcali-basaltos são exemplos desse processo.

Metamorfismo de contato metassomático (aliquímico)

Nesse processo, ocorre migração de elementos da intrusão para a encaixante e vice-versa. Normalmente, o silício migra da rocha mais silicosa para a menos silicosa. Nos exemplos mais clássicos, trata-se, principalmente, do contato de corpos básicos/ultrabásicos com rochas ricas em sílica. São duas as possibilidades desse processo de dessilicificação:

- Dessilicificação no contato de rochas ígneas básicas/ultrabásicas com rocha ácida (pegmatóide). Nesse caso, caracteristicamente há uma migração da sílica da rocha ácida portadora do Al para a básica/ultrabásica e formação de zonas de reação, gerando coríndon na porção empobrecida em sílica da rocha ácida. Safiras de Kashmir, do Quênia e do Transvaal foram formadas por esse tipo de processo (Figura 4).
- Dessilicificação por meio de rochas carbonáticas. É um processo similar ao anterior, cujas mineralizações do tipo escarnito, quando em contato com rochas ácidas, geram minerais cálcicos e coríndon. Exemplos desse processo são as jazidas do Sri Lanka e do Madagascar.

Figura 4. Esquema representativo da gênese do coríndon por processo metassomático de dessilicificação. O esboço mostra o contato entre pegmatito e rocha encaixante deficiente em sílica, mostrando zonas de reação com formação do coríndon.



M a g m a t i s m o B á s i c o

A origem magmática do coríndon é bastante polêmica. Primeiramente, tem-se que aspectos geoquímicos e texturais do coríndon e a presença de inclusões incompatíveis com o basalto indicam instabilidade. Na maioria dos casos, pode tratar-se de xenocristais incorporados pelo magma. Outra hipótese explica a presença do coríndon em alguns basaltos alcalinos por processos de assimilação de encaixantes aluminosas (ver tópico sobre Metamorfismo de Contato), aumentando o Al do magma e possibilitando a sua cristalização. Finalmente, o coríndon também ocorre em rochas ígneas, subsaturadas em sílica, tais como nefelina-sienitos, ou em rochas portadoras de xenólitos aluminosos. Coríndon ocorre associado a basaltos alcalinos na Tailândia (Chanthaburi), no Camboja (Pailin), na Austrália (Queensland, New South Wales e de Inverell-Glen Innes), em Kaduna, na Nigéria e na China (Mingixi, Penglai e Wenchang).



Foto 3. Cristais de coríndon provenientes do Estado de Minas Gerais. O cristal maior (com 7cm) é proveniente de Cláudio; à direita, Sapucaia, Indaia e Palmeiras; no centro, Caputira e, embaixo, da esquerda para direita, Campo Belo e Malacacheta. (Foto: Antonio Liccardo).

O C o r í n d o n n o M u n d o

Depósitos de coríndon são relativamente abundantes no planeta, mas locais que produzam rubis e safiras com qualidade gemológica são raros. Rubi e safiras são gemas caracteristicamente asiáticas. Neste milênio, não somente o mercado demandará maiores quantidades de coríndon, como também diferentes qualidades deverão se tornar economicamente viáveis. A tecnologia e a aceitação de tratamentos de melhoria das gemas, a partir dos anos 80 do século passado, e a descoberta de novas reservas na Ásia incrementaram o valor e a demanda de rubi e safiras. A combinação de condições políticas e econômicas favoráveis nos países produtores com a aplicação de novas tecnologias em prospecção e exploração poderá trazer bons resultados em termos de produção desse mineral.

Os principais produtores de rubi e safiras são atualmente Tailândia, Camboja, Sri Lanka, Birmânia (Myanmar), Austrália, Índia, Tanzânia e Estados Unidos. O Quadro 2 mostra os dez principais depósitos mundiais com descrição do ambiente geológico. Algumas dessas jazidas são mitológicas, pois estão produzindo há séculos e são famosíssimas pela qualidade do material produzido, como por exemplo o rubi sangue-de-pombo de Mogok, na Birmânia, considerado de qualidade incomparável e a safira azul de Kashmir, na Índia.

Quadro 2 Maiores depósitos de coríndon-gema do mundo (Hughes 1990).

Localidade	Modo de Ocorrência	Variedade
Mogok, Birmânia (Mianmar)	O rubi é encontrado em aluviões e cascalhos derivados de calcários metamorizados.	Rubi mais comum. Safira azul (também amarela, violeta, verde e asterítica ou com cambiamento).
Chantaburi (Tailândia) e Pailin (Camboja)	Rubi e safira em elúvios e aluviões derivados de basaltos alcalinos (Vichit 1978*).	Rubi. Safiras azul, amarela, verde e <i>Black star</i> .
Sri Lanka	Rubi e safira são encontrados em aluviões derivados de granulitos, pegmatitos, gnaisses granitíferos, skarns, cordierita gnaisses e rochas associadas (Hellmann & Herr 1986*).	Todas as cores, exceto verde. Também variedades asteríticas.
Kashmir, Índia	Safira azul em pegmatitos feldspáticos encaixados em corpos metassomáticos de actinolita-tremolita e em aluviões derivados dessas rochas (Atkinson & Kothavala 1983*).	Safiras azuis. Raras safiras rosas. Também asteríticas.
Queensland e New South Wales, Austrália	Safiras em aluviões e elúvios derivados de álcalis-basaltos (Coldham 1985*).	Safira azul, verde, amarela e <i>black star</i> .
Jagdalek, Afeganistão	Rubi in situ em calcários dolomíticos metamorizados, cortados por intrusões graníticas (Bower Sox 1985*).	Rubi.
Tanzânia	Rubi e safira em elúvios e aluviões derivados de calcários ou em veios pegmatíticos dentro ou bordejando pipe serpentínico (Bridges 1982*).	Todas.
Quênia	Rubi in situ ou em cascalhos eluvionares derivados de veios dessilicificados cortando rochas ultramáficas serpentinizadas ou dentro/próximo à zona de contatos pipes serpentinizados associados com segregações pegmatíticas dessilicificadas (Bridges 1982*).	Rubi.
Yogo Gulch, EUA	Safira em aluviões e cascalhos eluvionares derivados de diques ígneos lamprofíricos intrudidos em falha dentro de calcário (Brown 1982*).	Safira azul e violeta.
Kaduna, Nigéria	Depósitos secundários associados com álcali basaltos (Kiefert & Schmetzer 1987).	Principalmente safira azul. Também verde, amarela e bicolor.

*in Hughes (1990)



Foto 4. Exemplos brutos de safira e rubi, provenientes de Palmeiras (Manhuaçu - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

O coríndon com qualidade gemológica é encontrado, na maioria das ocorrências, em depósitos aluvionares e eluvionares. Dos dez maiores depósitos mundiais, apenas dois (Yogo Gulch, EUA e Kashmir, Índia) são explotados diretamente da rocha-matriz. Além dos depósitos aluvionares, coríndon é encontrado tanto em rochas ígneas quanto em metamórficas (ver seção Modelos genéticos).

Coríndon no Brasil

Historicamente, a presença de coríndon no Brasil tem sido relatada desde os anos 30 do século XX, mas sempre em ocorrências inexpressivas e sem viabilidade econômica. Na década de 60 do mesmo século, safiras azuis (e, em menor quantidade, amarelas) com boa qualidade gemológica foram encontradas no Rio Coxim (Mato Grosso do Sul). Outras ocorrências vêm surgindo desde então, às vezes com boa qualidade gemológica, mas com produção incipiente ou ainda com cristais muito pequenos. Nos anos 90, a principal ocorrência explotada foi Indaiá, em Minas Gerais, que, durante dois ou três anos, apresentou produção constante em escala comercial, mas que está paralisada desde 1996. O significativo aumento de ocorrências registradas (Figura 5) e o fato dos terrenos granulíticos no Brasil, semelhantes aos do Sri Lanka, grande produtor de rubis e safiras, terem sido ainda pouco estudados, são indício de boas perspectivas para um aumento na produção de coríndon gemológico brasileiro. Além disso, as novas técnicas de tratamento de gemas estão viabilizando ocorrências até há pouco consideradas antieconômicas.

Existem atualmente 28 ocorrências de coríndon registradas no Brasil (Figura 5), sendo a maioria encontrada em depósitos aluvionares associados a terrenos metamórficos de alto grau ou associadas a complexos alcalinos. Das ocorrências conhecidas, algumas apresentam boas possibilidades de aproveitamento gemológico (número que pode ser aumentado, considerando-se as possibilidades de tratamento térmico).

A melhor situação de ocorrência encontra-se em Minas Gerais, em regiões de potencial econômico favorável para coríndon como em Malacacheta e Indaiá, onde são encontrados cristais azuis/transparentes de qualidade gemológica comprovada, e nas novas ocorrências de Palmeiras e Sapucaia, onde ocorrem belíssimos (apesar de pequenos) exemplares de rubis e safiras azul e violeta com efeitos alexandrita, asterismo e seda. Ainda em Minas Gerais são conhecidas outras ocorrências como Campo Belo, Cláudio, Novo Cruzeiro, Conceição do Mato Dentro, Caputira, Datas, Passos e Bom Jesus da Penha.

Figura 5. Localização das ocorrências de coríndon conhecidas no Brasil.



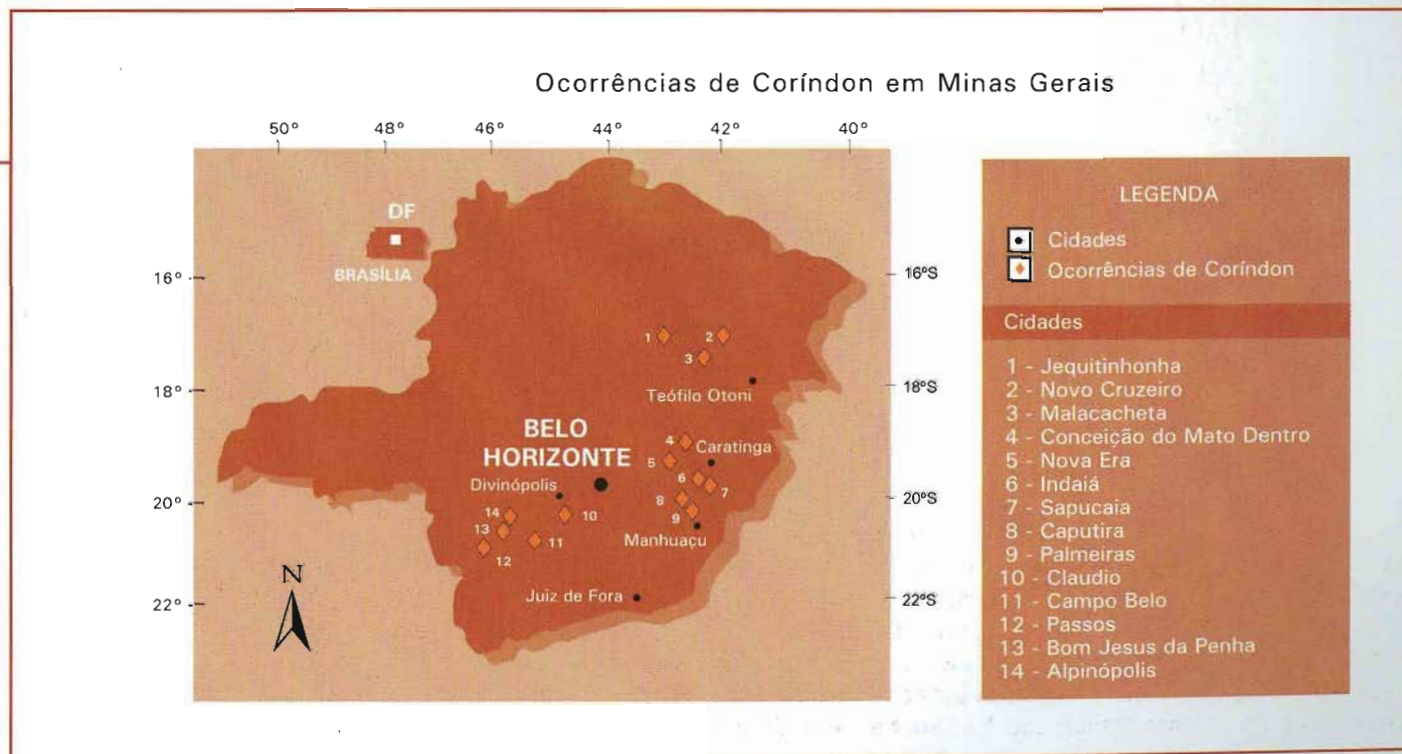
Na Bahia, são conhecidas há muitos anos as ocorrências de Anagé e Capim Grosso, sem, no entanto, possibilidades em escala comercial. Mais recentemente, o surgimento de coríndon com qualidade suficiente para a produção de cabochões em Lajedinho, Catingal e Uauá, e os novos investimentos do governo da Bahia na pesquisa de minerais-gemas podem trazer bons resultados em relação à produção de rubi e safira. Em Santa Catarina, os depósitos secundários de Barra Velha produzem intermitentemente rubis e safiras rosa com baixa transparência, mas com interessantes efeitos de asterismo e seda. Esses depósitos foram estudados por Chodur (1997), que associa a origem do coríndon a uma gênese metamórfica, o que é reforçado pelo fato de as ocorrências estarem encaixadas em terrenos granulíticos. Na Paraíba, são noticiadas ocorrências localizadas como a de Patos, associada a pegmatitos, com pequena produção de safira azul, também com baixa transparência.

Zanardo *et al.* (1996) descrevem em Passos e Bom Jesus da Penha (Minas Gerais), ocorrências de coríndon associadas a seqüências metassedimentares que sofreram metamorfismo regional. No Rio de Janeiro e em Tocantins, ocorre coríndon azul associado a rochas alcalinas. Zimbres (1987) registra três ocorrências de coríndon azul em Duque de Caxias, Rio de Janeiro, e associa a gênese de tais ocorrências a pegmatitos alcalinos. Kitajima & Gaspar (1998) descrevem a presença de coríndon azul em corpo plutônico mesoproterozóico de rochas alcalinas miasquíticas, no Complexo Alcalino de Peixe, em Tocantins.

No Brasil, ainda não se pratica nenhum tipo de tratamento térmico em rubi e safiras, pois a tecnologia para se conseguir bons resultados (com atmosfera controlada e altas temperaturas) não é de uso comum em escala comercial. O tratamento térmico é de fundamental importância para esse tipo de gema, pois parte do material descartado como sendo de baixa qualidade poderia ter seu valor sensivelmente aumentado se devidamente tratado. Portanto, a implementação desse processo pode viabilizar novas jazidas, pois análises preliminares realizadas em várias amostras mostraram que parte apresenta composição química adequada para mudanças de cor se tratadas termicamente.

Considerando-se a demanda crescente de rubi e safiras no mercado mundial e as perspectivas de diminuição de produção nos depósitos tradicionais, abrem-se boas possibilidades para a produção desse mineral também no Brasil. O aumento no número de ocorrências, algumas listadas no Quadro 3, e as novas tecnologias de tratamento poderão possibilitar, em futuro próximo, a participação do Brasil também no mercado dessas gemas.

Figura 6. Mapa de Minas Gerais com a localização das ocorrências de coríndon conhecidas.



Coríndon em Minas Gerais

Nas regiões Sul, Centro-norte e, principalmente, Leste de Minas Gerais, distribuem-se os principais depósitos de coríndon do Estado (Figura 6). Essas ocorrências concentram-se em três campos: Cláudio-Campo Belo, ao Sul, Malacacheta-Novo Cruzeiro, no Centro-norte, e Caratinga-Manhuaçu, a Leste. As ocorrências fora desses campos (Jequitinhonha, Passos, Alpinópolis e Bom Jesus da Penha) são consideradas de importância secundária como gema.

O principal campo, Caratinga-Manhuaçu, por concentrar o maior número de ocorrências, permite um estudo mais detalhado

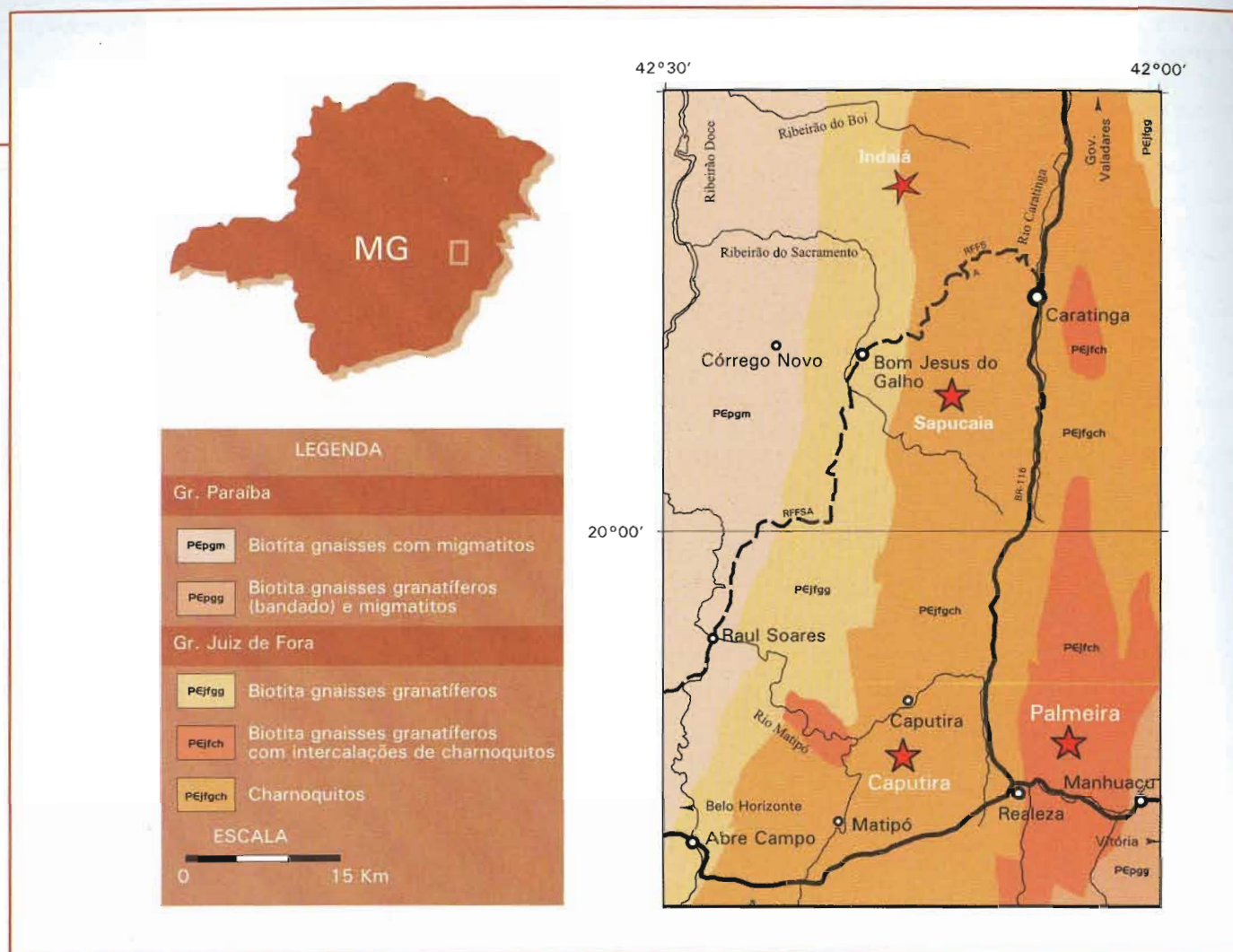
Quadro 3 Descrição sumária das ocorrências de coríndon no Brasil.

Local	Estado	Modo de ocorrência	Cores Predominantes	Qualidade Gemológica	Efeitos ópticos possíveis
Indaiá	MG	Aluviões e Colúvio	Azul, púrpura, violeta	Alta	Efeito alexandrita
Caputira	MG	Colúvio	Vermelho, castanho	Baixa	Seda
Sapucaia	MG	Aluviões e Colúvio	Azul, púrpura, violeta, preto	Média	Efeito alexandrita
Malacacheta	MG	Aluviões e Colúvio	Azul e incolor	Alta	Não
Novo Cruzeiro	MG	Aluviões	Vermelho e azul	Média	Não
Passos	MG	Rochas metamórficas	Cinza	Não	Não
Campo Belo	MG	Colúvio	Azul	Baixa	Não
Cláudio	MG	Aluviões e Colúvios	Castanho avermelhado	Baixa	Não
Nova Era	MG	Aluviões	Cinza	Não	Não
Jequitinhonha	MG	Aluviões	Cinza	Não	Não
Palmeiras	MG	Aluviões e colúvio	Vermelho, rosa e púrpura	Alta	Efeito alexandrita asterismo e seda
Conceição do Mato Dentro	MG	Aluviões	Verde	Baixa	Efeito alexandrita
Barra Velha	SC	Aluviões e Colúvio	Vermelho, rosa, preto	Baixa	Seda e asterismo
Lages	SC	Rochas Alcalinas	castanho	Não	Não

dos depósitos e da geologia. Quatro ocorrências, constituídas por depósitos secundários, são conhecidas nas localidades de Indaiá, Sapucaia, Caputira e Palmeiras, além de Conceição do Mato Dentro, próxima desse campo. Similaridades dos condicionantes geológicos e das características do material produzido sugerem um modelo genético em comum para todas essas ocorrências. Trabalhos recentes em rubis e safiras de outros lugares do mundo, também de depósitos secundários, mostram ser possível inferir a origem do mineral por intermédio de correlações químicas e do estudo de inclusões. Estudos comparativos dos depósitos da faixa Manhauçu-Caratinga e a associação com a geologia regional sugerem a existência de uma ampla zona com potencial para o surgimento de novas ocorrências de coríndon em Minas Gerais.

Local	Estado	Modo de ocorrência	Cores predominantes	Qualidade Gemológica	Efeitos ópticos possíveis
Coxin	MS	Aluviões	Azul, amarelo e verde	Alta	Não
Franca	SP	Aluviões	Vermelho	Não	Não
Peixe	TO	Pegmatitos e rochas alcalinas	Azul	Baixa	Não
Cannaã	RJ	Aluviões	Azul e cinza	Não	Não
Lajedinho	BA	Rochas metamórficas	Vermelho e rosa	Média	Não
Catingal	BA	Colúvio	Castanho, verde e amarelo	Baixa	Não
Paraguaçu	BA	Aluviões e Colúvios	Castanho	Não	Não
Anagé	BA	Aluviões	Castanho	Baixa	Não
Serrinha	BA	Aluviões	Castanho	Não	Não
Capim Grosso	BA	Aluviões	Castanho	Não	Não
Uauá	BA	Rochas metamórficas	Vermelho e castanho	Média	Não
Patos	PB	Pegmatitos	Azul	Baixa	Não
Gurupi	PA	Aluviões	Vermelho	Alta	Não
Itaituba	PA	Aluviões	Cinza	Não	Não

Figura 7. Esboço geológico da região de Manhuaçu-Caratinga, mostrando a localização dos depósitos de coríndon (simplificado da Folha de Belo Horizonte, Projeto Radar Brasil, 1978).



Campo de Manhuaçu-Caratinga

Nesta região, ocorrem litologias pertencentes a terrenos metamórficos de médio até alto grau, como gnaisses, granulitos e chornoquitos. Os depósitos de coríndon (secundários) encontram-se em terrenos gnáissicos-migmatíticos com presença eventual de rochas granulíticas, além de inúmeros corpos pegmatíticos que entrecortam toda a região.

Essa região tem sido alvo de diversos estudos e interpretações, recebendo várias denominações locais e regionais. Pedrosa-Soares *et al.* (1994) englobam-na dentro dos Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. Trabalhos recentes dataram esses complexos no Neoproterozóico (Juiz de Fora) e Arqueano (Complexo Mantiqueira). As rochas desse cinturão sofreram remobilização e rejuvenescimento tanto no Transamazônico (2.1 - 1.8 Ga) como no Brasileiro (0,68 - 0,45 Ma) (Fischel *et al.* 1998).

Indaiá

Na ocorrência de Indaiá, safiras de colorações que variam de azul profundo ao violeta, quase púrpura, são encontradas em depósitos coluvionares e aluvionares. Os cristais apresentam-se anédricos, geralmente de tamanho pequeno (< 4 mm) e alguns mostram um moderado efeito de mudança de cor (efeito alexandrita). Em termos de cor e transparência, as safiras mostram um bom potencial para aproveitamento gemológico, o qual pode ser sensivelmente aumentado com um tratamento térmico adequado.

Análises químicas (microsonda eletrônica, fluorescência de raios X) e espectroscópicas mostraram a presença de Fe, Ti e Cr como prováveis elementos causadores de cor na safira. O efeito de mudança de cor (efeito alexandrita) e a forte fluorescência são associados à presença do íon Cr^{3+} (Tabela 1).

Trabalhos recentes em coríndon de outras localidades no mundo utilizam a relação Cr/Ga e Fe/Ti como parâmetro indicativo da gênese do mineral, permitindo uma distinção entre as origens metamórfica e basáltica por meio da geoquímica de elementos traços (Sutherland *et al.* 1998 ; Sutherland & Schwartz 2001). Com base nesse parâmetro geoquímico, o material de Indaiá é de gênese metamórfica. Além disso o estudo de inclusões sólidas, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura, revelou a presença de um dos polimorfos de alumínio (Al_2SiO_5) dentro do mineral, apontando claramente uma associação com rochas metamórficas e descartando a possibilidade de esse material ter sido originado em rochas ígneas ou pegmatitos presentes na região.

Tabela 1

Variação dos teores dos principais elementos além do Al_2O_3 nas amostras de coríndon das principais ocorrências de Minas Gerais (% em peso).

	FeO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
Indaiá	0,32 a 1,09	0,02 a 0,05	0,06 a 0,11	0,01 a 0,11
Malacacheta	0,09 a 0,55	0,01 a 0,25	0,04	0,00 a 0,01
Caputira	0,18 a 0,34	0,00 a 0,03	0,07 a 0,17	0,01 a 0,08
Palmeiras	0,34 a 0,40	nd	0,09 a 0,13	0,04 a 0,11
Sapucaia	0,26 a 0,80	nd	0,01 a 0,02	0,03 a 0,09
Cláudio	0,65 a 0,74	0,01 a 0,07	0,51 a 1,04	0,05 a 0,09
Novo Cruzeiro	0,17 a 1,17	0,03 a 0,73	0,00 a 0,40	0,00 a 0,04



Foto 5. Garimpeiro de safiras na região de Indaiá (Vargem Alegre - MG).
(Foto: Antonio Liccardo).

S a p u c a i a

A safira de Sapucaia ocorre em cristais euédricos, subédricos e fragmentos irregulares, nas cores azul, púrpura, violeta, verde e preta. Apresenta-se em prismas hexagonais alongados e, muitas vezes, terminados em bipirâmide, com superfície externa dos cristais normalmente lisa e freqüentemente recoberta por moscovita microcristalizada. A maior parte dos cristais mostra dimensões em torno de 1cm, variando desde alguns milímetros até 8cm de comprimento (o maior exemplar encontrado até o momento). Os cristais exibem pronunciada partição basal e romboédrica nos planos de geminação polissintética. Em termos de diafaneidade, são opacos até transparentes e parte pode ser aproveitada como gema, apesar das abundantes fraturas; nos exemplares translúcidos e transparentes, foi verificada uma distribuição irregular da cor, além de inclusões opacas. Como efeitos ópticos especiais, foram observados o efeito alexandrita (safiras azuis em luz natural tornam-se violeta sob iluminação incandescente), o efeito seda (brilho prateado sedoso) e, nas safiras pretas, o asterismo com a formação de estrela de seis pontas. Sob iluminação ultravioleta de ondas curtas, as safiras mostraram uma reação fraca a moderada (violeta); em ultravioleta de ondas longas as amostras nas cores azul, violeta e púrpura apresentaram reação de fluorescência muito forte (vermelha) e, nas outras cores, reação moderada (violeta).

Os estudos preliminares da safira de Sapucaia apontam boas possibilidades de aproveitamento gemológico para esse material, à semelhança da safira de Indaiá, principalmente em relação às de cor azul e violeta e com efeitos ópticos especiais. Possivelmente, o aproveitamento poderá ser aumentado se essas safiras forem tratadas termicamente. Uma vez que o modo de ocorrência do coríndon em Sapucaia é muito similar ao de Indaiá, com depósitos secundários apresentando as mesmas características de composição mineralógica, em princípio, pode-se supor que a gênese também seja a mesma.



Foto 6. Safiras lapidadas provenientes de Sapucaia (Caratinga - MG). A gema maior pesa 0,30 quilate. (Foto: Antonio Liccardo).

Caputira

Em Caputira, o material encontrado difere bastante das ocorrências anteriores. O coríndon apresenta-se na sua quase totalidade em cristais excepcionalmente bem-formados, com primas hexagonais geralmente terminados em pinacóide, raramente com bipirâmides, com o hábito no formato de 'barrilete', típico para esse mineral, bastante incomum. A coloração varia de castanho a avermelhado com algumas tonalidades tendendo ao púrpura escuro. Os cristais são, em geral, centimétricos (até 4 ou 5cm). É comum, ainda, a presença de maclação polissintética segundo as faces romboédricas. Possivelmente o diásporo detectado por difração de raios X, análises termogravimétrica e termodiferencial e espectroscopia no infravermelho esteja localizado nos planos de geminação, o que compromete a transparência das amostras. O material produzido nesse distrito não apresenta aproveitamento gemológico, mesmo considerando-se possível tratamento térmico.

A química do coríndon de Caputira também apontou origem metamórfica. Campos (1999) cita ter sido encontrado um fragmento de rocha alterada com cristais de coríndon e descreve esse mineral como truncando a foliação definida pela orientação da mica nessa rocha. Esse autor sugere uma cristalização sin- a pós-tectônica em relação ao evento que gerou essa foliação, atribuindo, portanto, uma origem metamórfica para a rocha e o mineral.

Palmeiras

Essa é uma ocorrência encontrada mais recentemente na região e, por isso, a menos conhecida. Apresenta material com qualidade para o mercado de gemas. Os cristais de coríndon encontrados em Palmeiras são euédricos, de coloração predominantemente avermelhada (rubi ou safira rosa), em menor escala também violeta ou púrpura, com hábito prismático alongado e em 'barrilete', com tamanho variando de 0,5 a 4cm. Foi detectada a presença de zircão, diásporo e rutilo (arredondado e acicular) como principais inclusões. A presença de rutilo pode causar os efeitos de asterismo e *chatoyance* ou efeito seda. Além disso, alguns exemplares pequenos também mostraram o efeito alexandrita, semelhante a Indaiá e Sapucaia. O coríndon desse depósito também se encontra em colúvio e aluviões e, tal como para os demais depósitos da região, a discussão sobre a sua gênese poderá se basear nos estudos de seu registro geoquímico.



Foto 7. Garimpeiro de safiras na região de Palmeiras (Manhuaçu - MG). (Foto: Antonio Liccardo).

Foto 8. Cabochões e fragmentos de safira e rubi, provenientes de Palmeiras (Manhuaçu - MG). A gema maior pesa 4,2 quilates. (Foto: Antonio Liccardo).



Região de Malacacheta - Novo Cruzeiro

Nesta região, a ocorrência do Córrego do Fogo, no município de Malacacheta, é mais conhecida. Lá são extraídas safiras azul, incolor e bicolor de boa qualidade gemológica, associadas à alexandrita. O coríndon encontrado em Novo Cruzeiro, apesar de apresentar as cores azul ou vermelho, é de ocorrência muito restrita e, por isso, sem produção.

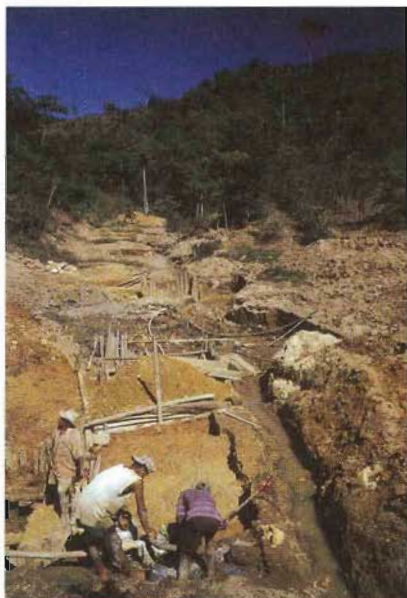


Foto 9. Garimpo aluvionar de safiras e alexandrita, na região de Malacacheta - MG. (Foto: Antonio Liccardo).

O coríndon dessa região ocorre em cristais euédricos transparentes, no formato típico de barrilete e tamanho normalmente pequeno ($< 1\text{cm}$). A maior parte dos cristais apresenta um marcante zonamento de cor, sendo incolor com um núcleo ou mancha de coloração azul intenso, transparência boa, tendendo à translúcida, principalmente na parte incolor. O pleocroísmo nas amostras azuis costuma ser moderado, de azul escuro a azul claro. Análises gemológicas convencionais resultaram num índice de refração variando de 1,759 a 1,764 para o raio ordinário e 1,767 a 1,770 para o raio extraordinário, conforme a amostra. A birrefringência média é de 0,009.

As inclusões sólidas identificadas em microscópio eletrônico de varredura foram ilmenita, ilmenita magnésiana e um polimorfo de Al_2SiO_5 . A difratometria de raios X e o comportamento em análise termogravimétrica indicaram ausência de diásporo ou boehmita, comumente presentes em coríndon e causadores de perda de transparência.

Foram também realizadas análises químicas por microsonda eletrônica que apontaram teores de FeO variando de 0,09 a 0,55% (em peso) e de TiO_2 variando de 0,01 a 0,09% (em peso - ver Tabela 1). A presença desses elementos indica que, muito provavelmente, a coloração azul das safiras de Malacacheta tenha como causa uma transferência de cargas eletrônicas entre os íons Fe^{+2} e o Ti^{+4} . Considerando-se esses teores de Fe e Ti e as características ópticas da safira, é possível que um tratamento térmico sob condições adequadas possa redistribuir a coloração azul ou mesmo transformar a cor branca leitosa em azul profundo na maior parte do coríndon retirado no Córrego do Fogo. Esse fato modificaria substancialmente o valor desse material no mercado de gemas, viabilizando a extração sistemática no local.



Foto 10. Safiras lapidadas provenientes de Malacacheta - MG. A gema maior pesa 1,5 quilates. (Foto: Antonio Liccardo).

Região de Cláudio - Campo Belo

As ocorrências de coríndon da região de Cláudio-Campo Belo localizam-se num complexo metamórfico de idade paleoproterozóica a neoarquena. Nesse complexo de rochas de alto grau, também há corpos ultramáficos e intrusivas granitóides. A gênese do coríndon pode estar associada tanto a processos metassomáticos, quanto a metamorfismo regional.

O depósito secundário de Campo Belo é caracteristicamente eluvionar-coluvionar, com cristais liberados da rocha matriz, encontrados dispersos em latossolo, numa área de topos planos e encostas suaves. Apresentam tamanho variável, chegando a 14mm de comprimento e diâmetro de até 8mm. Grande parte dos cristais mostra-se euédrico, na forma típica de 'barril' de seção hexagonal. Zonamento concêntrico de cor pode ser observado em grãos partidos, em uma tonalidade clara de azul com tendência a ser mais escura na parte central, mostrando manchas com trilhas esbranquiçadas nas bordas. O euedrismo dos grãos e as bordas agudas de fragmentos partidos indicam transporte quase nulo, ou seja, proximidade da rocha-fonte. Em princípio, o coríndon azulado de Campo Belo não apresenta transparência e coloração suficientes para aproveitamento gemológico. No entanto, através de tratamento térmico ou termoquímico, essa situação pode ser revertida.

Em Cláudio, foram encontrados cristais inclusos em matriz muito alterada, que mostra uma foliação metamórfica. O coríndon de Cláudio se apresenta relativamente euédrico, sem transparência, de coloração castanho-avermelhada, com pouca possibilidade de aproveitamento gemológico, mesmo levando-se em consideração os tratamentos existentes.

Outras Ocorrências

Dentro do Estado de Minas Gerais, são ainda conhecidas outras ocorrências de coríndon, porém sem perspectiva atual para produção de gemas, cuja compreensão da gênese pode apontar indicadores prospectivos desse mineral. São as ocorrências das localidades de Passos, Bom Jesus da Penha e Alpinópolis, no Oeste do Estado, fica Conceição do Mato Dentro, próximo ao eixo Manhuaçu-Caratinga, dos sedimentos aluvionares do rio Jequitinhonha e do garimpo de esmeralda da Capoeirana, em Nova Era, onde o coríndon aparece esporadicamente.





Foto 11. Cristais de coríndon encontrados pelos moradores dos arredores de Cláudio - MG. (Foto: Antonio Liccardo).

Considerações sobre Tratamento do Coríndon no Brasil

Themelis (1992), referindo-se a tratamento térmico em coríndon de vários países, faz menção às ocorrências conhecidas no Brasil. Dessas ocorrências, algumas são citadas como potencialmente indicadas para esse tratamento. Uma dessas ocorrências, Indaiá, MG, encontra-se melhor descrita, uma vez que esse autor realizou alguns testes em safiras desse depósito. As estimativas para o aproveitamento da safira de Indaiá, através de tratamento térmico, giram em torno de 40% do material produzido. Com efeito, as amostras obtidas em Indaiá apresentam muitas características similares à safira azul do Sri Lanka. Além de cores parecidas, ambos os depósitos produzem gemas com efeito de mudança de cor e altos teores de Cr^{3+} em sua composição. Themelis (1992) realizou alguns testes de tratamento térmico em amostras de Indaiá nas seguintes condições: atmosfera redutora e aquecimento a 1765°C por 30 minutos. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.

Esse autor faz menção, ainda, à possibilidade de se ressaltar o efeito de mudança de cor (efeito-alexandrita). Em atmosfera oxidante, o autor submeteu amostras de cor azul médio e violeta/púrpura a um aquecimento em 1760°C por 10 horas, registrando que o efeito-alexandrita que essas gemas apresentavam se tornou mais evidente. A presença de agulhas de rutilo como inclusões na safira de Indaiá sugere, ainda, a possibilidade de que efeitos tipo asterismo ou *chatoyance* venham a ser criados nessas gemas (Liccardo 1999), conforme tratamento térmico específico para esse fim (aquecimento entre 1300°C e 1900°C em atmosfera oxidante por tempo variável de 1 a 14 dias - Hughes, 1990).

Observação sob luz fluorescente (//eixo c)	
Azul	Violeta/Azul
Azul claro/Violeta	Azul médio
Violeta médio/Azul	Violeta muito escuro/Púrpura
Violeta/Azul	Perda de cor; Rosa/Violeta

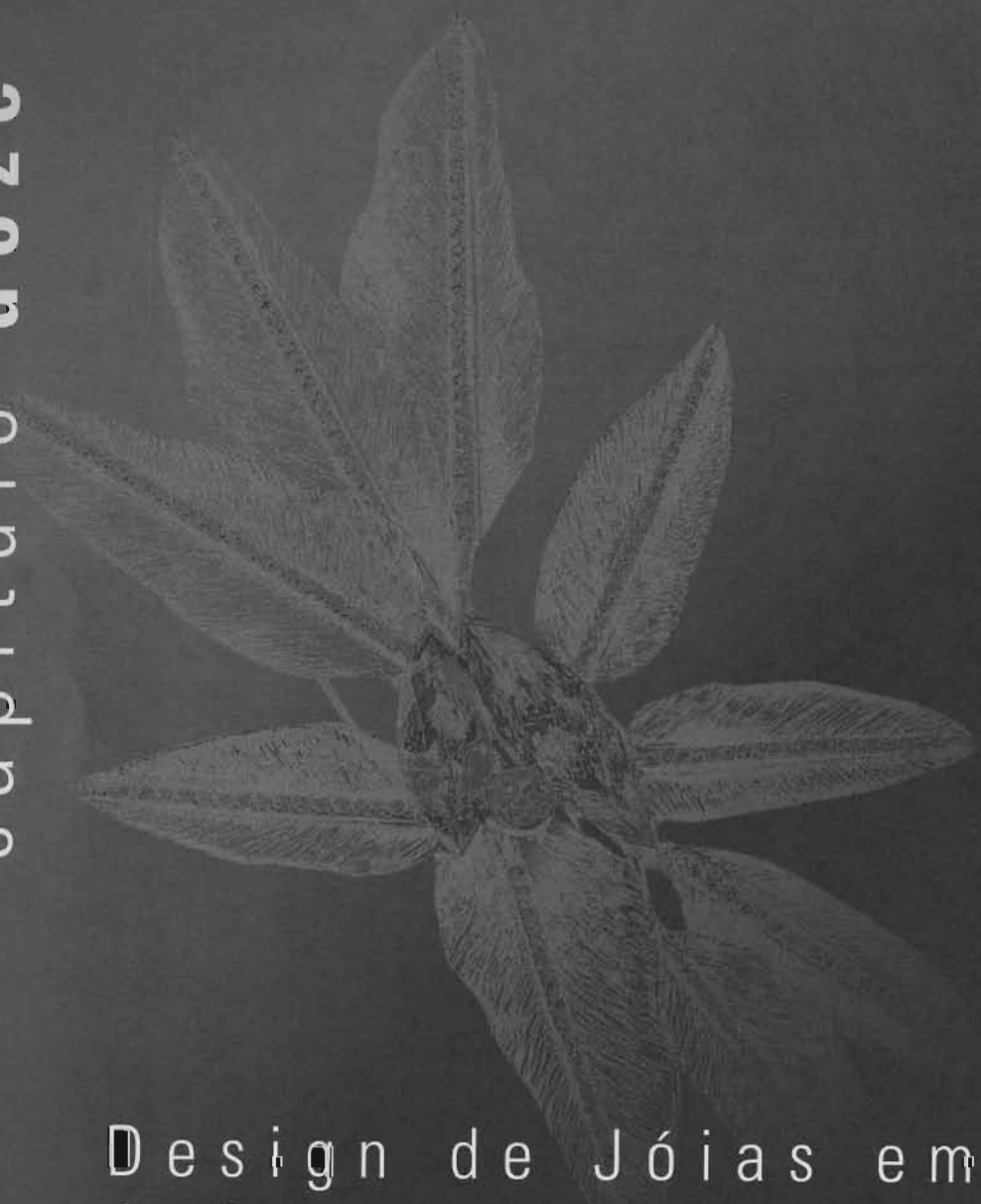
Projetando-se esses resultados e aplicando-se sistematicamente a tecnologia de tratamento em coríndon produzido no Brasil, principalmente em Minas Gerais, tudo aponta para que, em poucos anos, rubi e safiras brasileiros venham a participar intensamente do mercado mundial dessas gemas.



Bibliografia Consultada

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Litwinski, N. 1984 - O Pré-Cambriano no Brasil. São Paulo, Edgard Blücher, 318 p.
- Campos, J.C.S. 1999. Os depósitos de caulim, ametista e coríndon a NW de Manhuaçu (MG): geologia da área, mineralogia e gênese. UFOP, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 179 p.
- Chodur, N. L. 1997. Mineralogia e geologia dos depósitos de rubi e safira da região de Barra Velha, Santa Catarina. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 210 p.
- Chodur, N.L.; Svisero, D.P. 1994. Diásporo em rubi e safiras do depósito de Barra Velha, SC. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário Camboriú. Resumos Expandidos, 58-59.
- Coenraads R.R. 1992. *Sapphires and rubies associated with volcanic provinces: Inclusions and surface features shed light on the origin. Australian Gemmologist*, 18: 70-90.
- Cunningham, D., Alkmin, F.F., Marshak, S. 1998. *A structural transect across the Coastal Mobile Belt in the Brazilian highlands (latitude 20°): the roots of a precambrian transpressional orogen. Precambrian Research*, 251-275.
- Dahanayake, K.; Liyanage, A. N., Ranasinghe, A.P. 1980. *Genesis of sedimentary gem deposits in Sri Lanka; Sediment. Geol.* 25: 105-115.
- Epstein, D.S., Brennan, W., César-Mendes, J. 1994. *The Indaiá Sapphire Deposits of Minas Gerais, Brazil. Gems & Gemology*, 30(1):24-32.
- Fischel, D.P.; Pimentel, M.M.; Fuck R.A.; Costa, A.G. & Rosière, C.A. 1998. *Geology and Sm-Nd Isotopic Data for the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes (Ribeira Belt) in the Abre Campo - Manhuaçu Region, MG, Brasil - In: 14th International Conference on Basement Tectonics*, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 21-23.
- Greiff, S. 1994. *Petrologie Rubin-Führender Gneise in Karnataka, Indien*. Universidade de Mainz, Alemanha, Tese de Doutorado, 135 p.
- Guo J.F., O'reilly, S.Y. & Griffin W.L. 1992. Origin of sapphire in eastern Australian basalts. Inferred from inclusion studies. Geological Society of Austrália. Ballarat, Austrália, 32: 219-220.
- Hughes, R.W. 1990. *Corundum. Butterworths Gem Books*, London, 314 p.
- Kitajima, L.F.W. & Gaspar, J.C. 1998. A monazita do Complexo Alcalino de Peixe - TO. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte. Anais, p.454.
- Levinson, A. A. & Cook, F. A. 1994. *Gem Corundum in Alkali Basalt: Origin and Occurrence. Gems & Gemology*, 30: 253-262.
- Liccardo A. & Jordt-Evangelista, H. 2000. Ocorrências de Coríndon na Porção Leste de Minas Gerais. *Geonomos*, 8 (1): 39-45.
- Liccardo, A & Chodur, N.L.. 1999. Coríndon em terrenos granulíticos de Santa Catarina e Minas Gerais. In: VII Simpósio Sul Brasileiro de Geologia e II Encontro de Geologia do Mercosul, Foz do Iguaçu - PR. Boletim de Resumos, 43.
- Liccardo, A.; Chodur N. L.; Jordt-Evangelista, H. & Costa G. M. 2000(b). Identificação de Fases Hidratadas em Coríndon no Brasil. In: I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, Ouro Preto, MG, Boletim de Resumos, 36.
- Liccardo, A.; Chodur, N. L. & Jordt-Evangelista, H. 2000(a). Caracterização Preliminar da Safira de Sapucaia, em Minas Gerais. In: I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, Ouro Preto, MG, Boletim de Resumos, 34.
- Liccardo, A.; Jordt-Evangelista, H.; Ferreira, C.M.; Sabioni A.C.S. & Chodur, N.L. 1999 - Geoquímica em Amostras de Coríndon no Brasil. In: V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa & VII Congresso Brasileiro de Geoquímica, Porto Seguro, BA, anais, 274.
- Liccardo, A. 1999. Safiras de Indaiá, Minas Gerais - Mineralogia, geologia e gemologia. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, 126p.
- Munasinghe, T.; Dissanayake, C.B. 1981. *The origin of gemstones of Sri Lanka. Economic Geology*, 76: 1216-25.
- Pedrosa-Soares, A. C.; Dardenne, M.A.; Hasui, Y.; Castro, F.D.C.; Carvalho, M.V.A. 1994. Nota explicativa do mapa geológico de Minas Gerais. Belo Horizonte, COMIG, 97p.
- Rapasinghe, M.S.; Dissanayake, C.B. 1985. *Charnockites and the genesis of gem minerals. Chemical Geology*, 53: 1-16.
- Sabioni, A.C.S. & Ferreira, C.M. 1996. Alguns aspectos técnicos e econômicos do tratamento térmico de gemas. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, MG, 49: 60-66.
- Schwartz, D.; Petsch E.J & Kanis J. 1996. *Sapphires from Andranondambo Region, Madagascar. Gems & Gemmology*, 32: 80-99.
- Sutherland, F.L.; Schwartz, D. 2001. *Origin of gem corundums from basaltic fields. The Australian Gemmologist*, 21(1):30-33
- Sutherland, F.L.; Schwartz, D.; Jobbins, E.A.; Coenraads, R.R.; Webb, G. 1998. *Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: a comparative study of Barrington, Australia and West Pailin, Cambodia gemfields. Journal of Gemmology*, 26: 65-85.
- Themelis, T. 1992. The heat treatment of ruby and sapphire. 1st ed. USA, Gemlab Inc, 236p.
- Wernick, E.; Almeida, F.F.M. 1979. *The geotectonic environments of early Precambrian granulites in Brazil. Precambrian Research*, 8: 1-17.
- Zanardo, A.; Morales, N. & Del Lama, E.A. 1996. Novas ocorrências de coríndon na região de Passos e Bom Jesus da Penha - MG. *Geociências*, 15: 133-142.
- Zimbres, E. 1987. Prospecção com bateia no Maciço Alcalino de Canaã e adjacências, município de Duque de Caxias - RJ. Instituto de Geociências, UFRJ, Dissertação de Mestrado, 67 p.

capítulo doze



Design de Jóias em Minas Gerais
A Construção de uma Identidade
Maria Bernadete Santos Teixeira

I n t r o d u ç ã o

A necessidade de dar respostas rápidas às exigências e movimentações aceleradas do mercado usuário de produtos trouxe mudanças no seu padrão de competitividade, levando as empresas a buscar novas estratégias para a conquista e manutenção dos mercados, tanto interna quanto externamente. "Junto à qualidade, produtividade e inovação tecnológica, as estratégias incluem o design como fator decisivo de competitividade dos produtos no novo cenário." (Programa Brasileiro de Design, Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo, 1995)

A mundialização, ao contrário do que se imaginava, fragmentou o consumo em grupos e blocos que cada vez mais exigem produtos de especificações variadas, desenvolvidos em períodos mais curtos e articulados mais pelas diferenças do que pela uniformização.

Este novo paradigma vem aos poucos derrubando os preconceitos e equívocos quanto à atividade do design - ainda entendida pela grande maioria do empresariado como uma atividade apenas de criação formal - estendendo a sua atuação a todos os níveis de desenvolvimento do produto, desde o da estratégia, do desenvolvimento do produto em si, até ao do gerenciamento (design management).

Neste processo, o design é a atividade que se refere tanto ao terreno da criatividade, onde as idéias e conceitos são gerados, quanto ao da produção, quando as idéias são transformadas em produto, demandando conhecimentos de outras áreas - da concepção até o seu descarte - com uma abordagem multidisciplinar que inclui o conhecimento de materiais, sistemas de produção, tecnologia de transformação, tendências e estilos de vida.

Atraídos por sua relevância estratégica, alguns setores têm incentivado as empresas a adotar práticas e políticas de design, a fim de inovarem seus produtos, tornando-os mais competitivos. Em Minas Gerais, apesar do papel preponderante que o Estado desempenha na economia nacional, muitos setores ainda desconhecem a importância e amplitude da atividade dentro de uma empresa, e seu papel na distinção do produto, mantendo ainda aquela idéia equivocada que limita o design apenas à aparência externa do objeto.

O setor de gemas e jóias, através do seu programa (deliberação do Conselho Estadual de Ciência e Tecnologia - CONECIT, 003/1999) identificou a ausência do design como uma das razões de defasagem do nosso produto de joalheria em relação ao produto externo. A fim de impulsionar o setor, o programa Gemas e Jóias tem como objetivo *"melhorar a produção, a produtividade e a qualidade das gemas, fundição de jóias, tratamento de gemas e design aplicado a processos de produção"*.

Ainda que concentre em seu território o maior número de riquezas minerais do país, estas, sem beneficiamento interno acabam sendo exportadas quase sempre em estado bruto, o que significa que *"Minas Gerais está agregando pouco valor às suas matéria-primas"*. Este patrimônio, que a natureza oferece, poderia ser melhor difundido se mais aplicado em jóias, cujo potencial no Estado é tanto uma vocação, quanto uma tradição. Como uma das mais belas representações do mundo mineral, as gemas têm sua aplicação em objetos cada vez mais ampliada e facilitada pelas inovações tecnológicas. Elas permitem corrigir e melhorar artificialmente aspectos indesejáveis, melhorando a qualidade, aumentando a valorização e sua beleza. Mas, o design para gemas ainda é um setor carente e o design de jóias nem sempre considera as múltiplas possibilidades oferecidas por essa grande riqueza que Minas Gerais dispõe, e que poderia se converter no diferencial que caracterizaria e identificaria regionalmente o produto.

No que se refere às jóias, além das muitas dúvidas que ainda prevalecem quanto ao papel do design no desenvolvimento do produto, outros problemas também contribuem para inibir seu pleno desenvolvimento, como a escassez de informações sobre o seu grau de inserção e contribuição para a indústria. Os poucos registros sobre o que é feito no país – a maioria das publicações concentra-se em dados históricos de edições estrangeiras – dificultam o acesso a informações, com sensível prejuízo para o desenvolvimento do projeto, havendo a necessidade de ampliar as condições de pesquisa na recuperação, registro e disponibilidade de dados relativos à nossa indústria, mais especificamente sobre o processo de design de jóias dentro dela.

Em Minas Gerais, embora hajam a matéria-prima, a qualidade de produção e uma vocação tradicional para a criação de jóias, o design ainda não se integra ao sistema produtivo, sendo o design próprio atributo de uma minoria de empresas.

Composto por quatro grandes segmentos: jóias fundidas, pedras preciosas, estamparia e produção artesanal, o complexo industrial joalheiro mineiro, com uma diversificada produção, atende a diversas segmentações do mercado. A análise de suas diferentes trajetórias e estratégias desenha um quadro irregular, com diferenças e similaridades que dificultam uma homogeneização dentro de padrões significativos, mas que sublinha uma mobilização em direção à melhoria da qualidade do produto.

O ciclo de produção deste segmento é dividido em etapas específicas que envolvem o projeto, quase sempre restrito ao desenho da jóia, modelagem, fundição e produção. A produção artística, o projeto, e a realização, a produção, quase sempre estranhos entre si, muito pouco se comunicam. Por envolver uma etapa artesanal que exige trabalho humano qualitativamente refinado, a mão-de-obra especializada é condição indispensável à qualidade pretendida.

Integrar o design ao sistema produtivo significa integrá-lo não só de forma a reconhecer sua particular contribuição dentro do processo, mas ir além de identificar os aspectos essenciais do produto para abranger aspectos da empresa e do seu contexto.

"Fatores como custo, manufatura, performance, qualidade e distribuição são alguns elementos essenciais ao produto, mas não bastante por si sós. Para o consumidor um produto é a própria empresa, o primeiro fator na percepção do que ela realmente representa. A sua filosofia, sua estrutura, seu sistema de valores e sua atitude frente aos consumidores devem estar manifestos no produto, numa extensão maior dos requerimentos que assumem os aspectos de produzir, consumir e estabelecer conexões" (HESKETT, 1989)

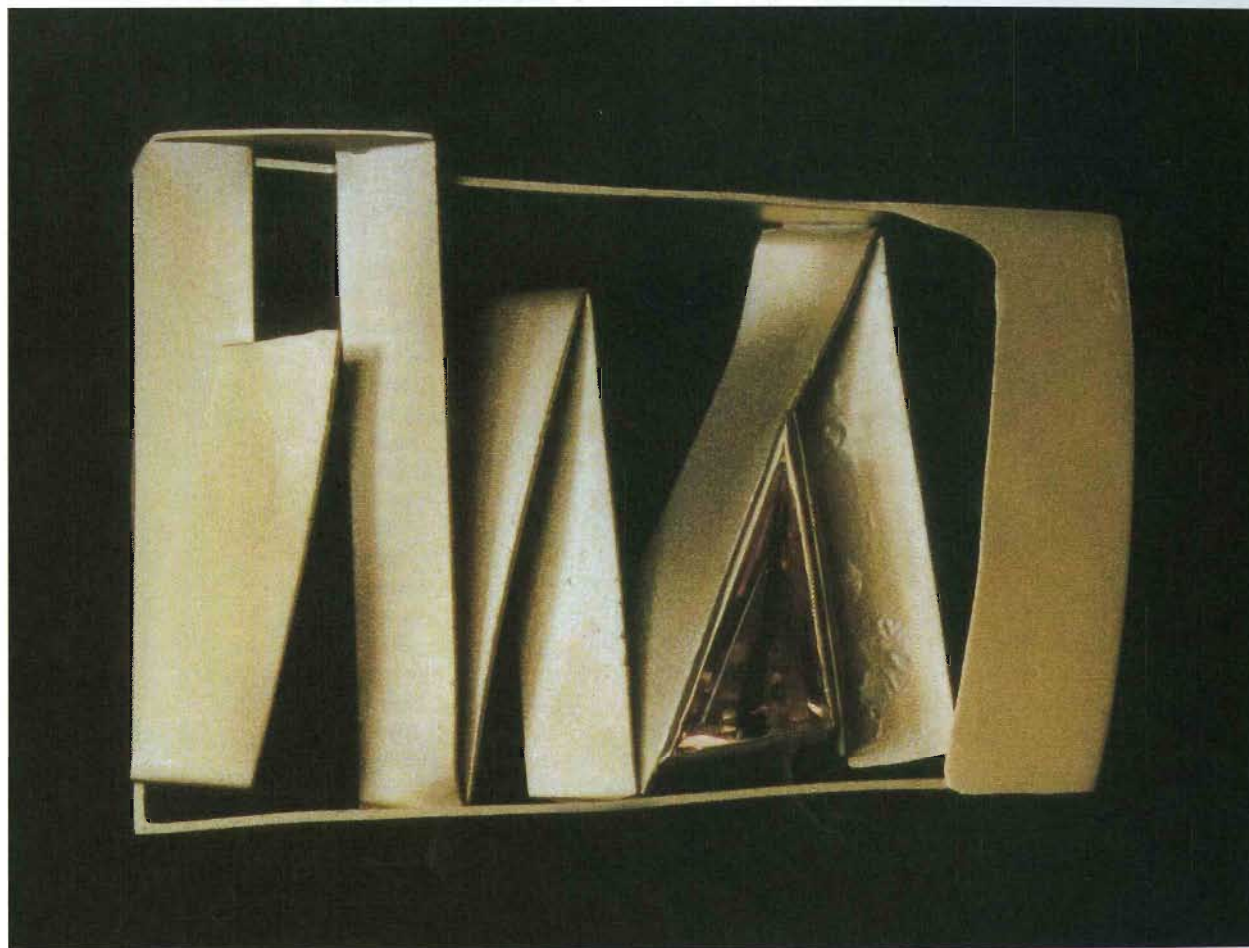
O design, portanto, "não pode ser considerado em si mesmo, ou algo a ser pensado e resolvido apenas pelos designers" (GRANNATH, 1991). É atividade coletiva que envolve outros campos do conhecimento e diferentes competências. E o design de jóias, pelas especificidades inerentes ao processo, que requer o exercício tanto das faculdades imaginativas, quanto das manuais e técnicas, exige que os atores envolvidos no processo movam-se com familiaridade dentro da realidade produtiva, cujos limites e potencialidades estarão condicionando o processo de criação e o desenvolvimento do produto.

E isto requer uma operação cada vez mais integrada de todos os envolvidos, estreitamento que se viabiliza pelo projeto de design e está cada vez mais facilitado pelas novas tecnologias, que trazem novas formas de trabalhar em grupo, com destaque para *concurrent engineering* e o *simultaneous design*.

A forma como as empresas articulam seus diferentes potenciais humanos e tecnológicos e experimentam novas combinações materiais e métodos de produção, para se adaptar às movimentações do contexto e às exigências e particularidades dos seus



usuários, vai se refletir nos seus produtos. E estes, através de um jogo de linguagem, vão de forma única e particular refletir o estilo de vida e a cultura do próprio contexto, e a práxis que faz a identidade de cada empresa e de seus produtos.



● Foto 1. Broche em ouro amarelo com topázio imperial, inspirado na obra de Amílcar de Castro, de Angelo Pignataro. Peça exclusiva e de propriedade particular.

O Design no Desenvolvimento Integrado do Produto

Pode-se afirmar que o design nasce no momento em que o homem, a partir de um desejo ou necessidade, começa a atuar técnica e conscientemente sobre seu mundo natural, modificando a matéria e criando novas formas de utilizá-la. Esta habilidade, interface entre o homem e seu meio, associada à criação, é o design (OWEN, 1993) que lhe permitiu inventar os próprios artefatos, que evoluíram à medida que evoluía a sociedade, e surgiam novas necessidades.

Ainda que o design seja tão antigo quanto o próprio homem, como disciplina é relativamente jovem, não possuindo a estrutura interna e os fundamentos teóricos que possuem as disciplinas consagradas, o que o leva a ser confundido com a arte ou a ciência, conforme o contorno que adquire em cada contexto ou situação específica (BONFIM, 1995). Assim, dentro dos contextos vem assumindo uma diversidade de conceitos que conduzem a diferentes correntes e direções, bem como a diferentes entendimentos e significados.

O conceito de design descrito como estilo, por exemplo, confundiu-se durante anos com os elementos externos e decorativos do objeto, uma espécie de maquilagem, que era introduzida e cuidada apenas na fase final do desenvolvimento do produto. O estilo e a forma serviam para encobrir a sua qualidade e função, não contemplando os seus aspectos invisíveis, ou que não aparecem externamente. A atividade de design somente se integrou aos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, quando os japoneses começaram, na década de 60, a introduzir inovações nos objetos eletrônicos vindos dos Estados Unidos, percebendo que a orientação formalista que considerava o design apenas como aparência externa já não se aplicava aos interesses - nem da indústria, nem dos usuários - que iam muito além da estética, envolvendo outras questões que precedem seu processo construtivo, relacionadas ao ambiente social, econômico e cultural do produto.

No início do século XX a estética do objeto era um resultado natural da solução funcional e produtiva, sintetizada pela ideologia tecnocrática da época e traduzida em objetos precisos e eficientes "*projetados conforme idéias funcionais e não realidades*" (RODRIGUEZ, 1998). A relação do usuário com os objetos resumia-se ao atendimento prático de suas necessidades, sem considerar que, por trás das finalidades funcionais, existe uma função diferencial, à qual nenhum objeto escapa, simbolizando traços, categoria social e status dos usuários. A essa ordem racional, que postulava uma visão universalista das necessidades, opôs-se o formalismo, trazendo consigo várias correntes que tinham em comum a economia formal dos geometrismos e a exploração das possibilidades tecnológicas de produção. À liberdade formal, somava-se uma total negligência ao aspecto comercial e mercadológico, resultando em objetos caros e supérfluos, restritos às elites.

Ainda que a forma seja a função final na concepção do objeto, seu processo construtivo envolve a coordenação, integração e articulação de todos os fatores funcionais relativos ao uso, consumo individual e social, bem como os simbólicos e culturais e, ainda, aqueles que se referem à sua produção. É uma atividade que requer o controle e o gerenciamento do processo de forma integral, compatibilizando design, mercado e processos produtivos. Uma das grandes mudanças historicamente observadas em relação à produção de objetos, refere-se a esta inter-relação que deve existir entre a concepção, a produção e a comercialização. Até a Era Industrial todo este processo era conduzido pelos artesãos, quando passaram então a ser distintos, sendo novamente integrados nos anos 80, agora entendido como atividades articuladas.

Um outro conceito, (MALDONADO, 1997) que considera o design como projeção de objetos fabricados industrialmente por meio de máquinas e em série, também traz consigo ambigüidades, pois pode ser confundido com a atividade do engenheiro, principalmente o engenheiro mecânico, e não supõe objetos que sejam produzidos artesanalmente, nem considera os muitos especializados, fabricados em exemplares únicos. Isto inclui tanto um trem quanto uma jóia especial.

Mas, à medida que os países foram se convertendo em uma economia comum, e o impacto do fenômeno globalizante quebrava a unidade que identificava e caracterizava o mercado de produtos, o design deslocou-se da primazia da função e expressão para o valor dos objetos, medidos pela relação custo-benefício e poder de compra dos seus usuários. As características expressivas passam a se orientar pelas tendências de moda, valor agregado e inovação. Aos poucos, o design vai deixando de se constituir em medida





265



● Foto2. Anel em ouro branco, brilhantes, quartzo negro e quartzo branco, de Suka Braga.



Foto 3. Conjunto em ouro amarelo, diamantes e citrino (lapidação especial Manoel Bernardes), de Maristela Guedes, Coleção Passione. Manoel Bernardes.

secundária, e a inovação torna-se uma das principais razões para que ele se integre à estrutura empresarial como vantagem estratégica e competitiva, com o planejamento e a produção. Enquanto ganha relevo, nas últimas cinco décadas, a atividade passa a integrar as medidas e planos econômicos das grandes nações, com os governos aplicando em programas específicos, como o *Design Center* da Inglaterra, que existe desde 1944, e o *Japan Industrial Promotion Organization*, desde a década de 50. No Japão, o design tornou-se o eixo de competitividade no século XXI; o design italiano tem sido considerado o fator responsável pelo sucesso de sua indústria e, em Taiwan e Hong Kong, é parte integrante dos planos econômicos. Isso deixa evidente que a dinamização e o desenvolvimento das forças produtivas passam pela aceitação e inovação de seus produtos e que esta não deve ser uma preocupação apenas dos grandes centros, mas de todos que perseguem o aumento da competitividade de seus produtos no novo cenário globalizado.



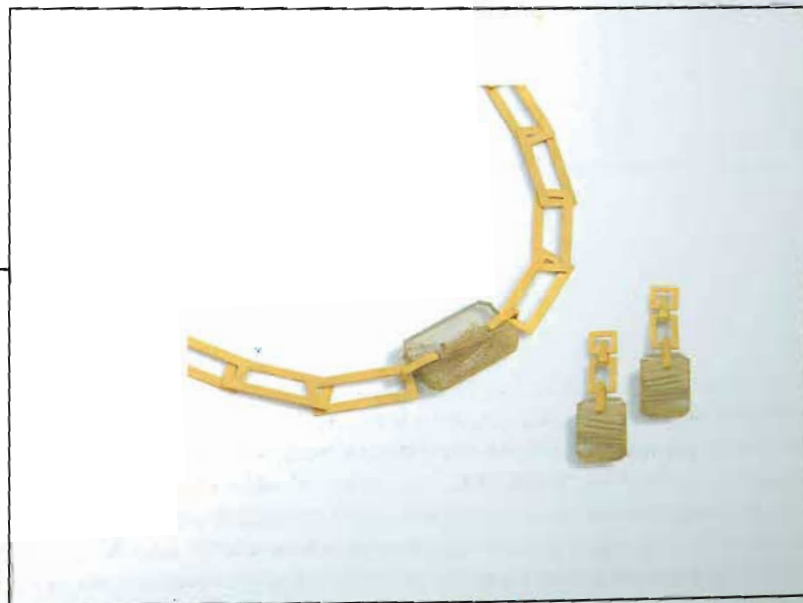
No Brasil, apesar de contar com iniciativas desde os anos 50, quando Pietro Maria Bardi abriu as portas da indústria paulista para os designers, sua evolução vem se dando lentamente. Os anos 90 é que marcam a sua inserção no tecido econômico brasileiro, quando foi oficialmente reconhecido *"como um dos mais importantes instrumentos para o aprimoramento dos bens aqui produzidos"*, através do Programa Brasileiro de Design do Ministério da Indústria do Comércio e do Turismo. (1995). No programa, a atividade convencionada como design *"é a atividade especializada de caráter técnico – científico, criativo e artístico, com vistas à concepção e desenvolvimento de projetos de objetos e mensagens visuais, que equacionem sistematicamente dados ergonômicos, econômicos, sociais, culturais e estéticos que atendam de fato às necessidades humanas."*

As versões estaduais do programa, que atenderiam às demandas e setores específicos da região, contaram com movimentos expressivos em alguns estados. Mas, em Minas Gerais o "Minas Design", lançado em 1996, não teve repercussão na mídia e com os empresários. Não encontrou eco nos agentes econômicos e sociais, nem nos próprios órgãos responsáveis pelos sub programas.

Alguns setores da indústria mineira, por iniciativa própria, têm investido no design para agregar valor a seus produtos, devido à necessidade de se abrir para uma maior competitividade, tanto no mercado interno, quanto externo. Alguns fatos são bem reveladores, destacando empresas e designers nas feiras e premiações nacionais e internacionais. Apesar disso, ainda prevalecem os equívocos conceituais que confundem o design com a arte ou o relegam ao plano só do desenho, não o entendendo como um processo que deve acompanhar todo o ciclo de vida do produto. Raramente é incluído no planejamento estratégico da empresa. O design tem caráter prático, funcional, significativo e concreto a serviço de uma necessidade que deve ser atendida. O artista cria segundo um estilo que condiciona as dificuldades técnicas e materiais à sua forma pessoal. O estilo no design está ligado ao modo de afrontar e resolver um problema de modo objetivo, à ação pessoal do profissional ao estabelecer conceitos e unidades do produto, a partir das técnicas e manejos de informações (MUNARI, 1976). Mesmo reproduzido, o objeto de arte não se iguala à escala de produção industrial do produto.

"O design industrial é uma atividade criativa cujo objetivo é determinar as propriedades formais dos produtos industriais. Por propriedades formais, não se deve entender apenas as características exteriores, mas sobretudo as relações estruturais e funcionais que fazem de um objeto (ou sistema de objetos) uma unidade coerente, tanto do ponto de vista do produto, quanto do consumidor." (International Council of Societies of Industrial Design - ICSID).

Foto 5. Conjunto em ouro amarelo e quartzo rutilado (lapidação especial Manoel Bernardes), de Gláucia Silveira, Coleção Elos. Manoel Bernardes.



O conceito de design como ferramenta de competitividade, associado à inovação, qualidade e tecnologia, ainda não integra as matérias de negócios dos meios de comunicação, nem se difunde na maioria das empresas, principalmente as de pequeno porte. O design deve ser entendido como um processo que deve ser aplicado a toda cadeia produtiva, requerendo uma operação cada vez mais integrada de todos aqueles que estão envolvidos no processo, considerando as variáveis do contexto e privilegiando seus próprios fatores, ou os efeitos que aí pode operar.

O processo do design é um processo estruturado que envolve fases distintas que, embora não sigam sempre a mesma ordem, começa sempre com fases analíticas que se referem ao contexto do problema, problema entendido como um desejo ou necessidade



● Foto4. Conjunto em ouro amarelo e quartzo *fumê* (lapidação especial Manoel Bernardes), de Gláucia Silveira, Coleção Elos. Manoel Bernardes.



Foto 6. Anel, pingente e brincos em ouro amarelo, citrino e brilhantes, de Raimundo Vianna. Raimundo Vianna.

a ser atendida (OWEN, 1993). Isso significa trazer para o projeto todos os aspectos essenciais ao produto, contendo dados da necessidade a ser atendida por ele, do segmento do mercado e do contexto. Esta fase de coleta e análise dos dados que precede o projeto, o pré-design, além das equipes técnicas especializadas como o marketing, deve envolver, com a equipe de projeto outras áreas da empresa. Os diversos especialistas e suas diferentes visões permitirão elaborar um briefing que contemple todas as óticas do problema. Este instrumento, contendo os dados relativos ao produto, à empresa e seu ambiente, dará os subsídios que tornarão possível a passagem da compreensão do contexto para o produto, conferindo-lhe as características que serão traduzidas no seu conceito e que vão distingui-lo dentre tantos similares. Permite, também, visualizar as potencialidades e limitações que envolvem a sua produção, dando maior flexibilidade e rapidez ao seu desenvolvimento, além de reduzir a lacuna, tradicionalmente existente entre quem cria e quem produz. Do desenvolvimento integrado do produto vão emergir os valores e práticas acumuladas do grupo, envolvendo todos no mesmo grau de responsabilidade, enquanto dentro do processo cada um colabora de acordo com sua expertise, com as exigências e requerimentos particulares de cada projeto, atendendo assim de um lado o mundo específico do produto – cliente/indústria, e de outro, os estilos de vida – cliente/usuário

A Jóia como Objeto de Distinção no Contexto Histórico

O estudo da história tem permitido conhecer as experiências bem sucedidas do passado e mapear os aspectos específicos que construíram os modelos universais e o contexto sobre os quais os objetos evoluíram e se desenvolveram. O que a perspectiva histórica tem revelado é que ao conceber seus objetos, o homem projeta neles as codificações sociais do seu contexto, refletindo a variedade de atitudes com que tem enfrentado os desafios de sua existência. (KAVOLIS, 1968).



270



● Foto 7. Anéis, de cima para baixo, em ouro branco, topázio e brilhantes; em ouro amarelo, citrino e brilhantes; e, em ouro amarelo, ametista e brilhantes, de Raimundo Vianna. Raimundo Vianna.

Da infinidade de objetos que ele tem produzido, os de adorno, precedendo a própria vestimenta, destacam-se como a sublimação artística de uma necessidade humana primitiva de não apenas se adornar, mas de se destacar como indivíduo, reforçar uma posição social, ou um modo de vida. Em todas as épocas e culturas, o adorno aparece com implicações estéticas, ritualísticas e simbólicas, marcando os movimentos históricos e tecnológicos, que consagraram experiências e soluções que atendiam às exigências particulares e aos critérios de cada contexto, sobre o qual se desenvolveu e evoluiu.

Desde as sociedades mais primitivas, quando os principais materiais e técnicas foram introduzidos que o adorno vem se transportando de uma cultura a outra, assumindo os aspectos e a conformação física que o processo técnico possibilita, criando novas formas, inovando-as e melhorando a qualidade das precedentes. Conforme a disponibilidade de cada contexto, os materiais aplicados podem variar desde os mais modestos como fibras, penas e contas até os mais preciosos como os metais e pedras das raras e preciosas jóias. Esta variedade também se aplica ao seu uso, que ora se apresentava recobrimdo fulgurante noivas como Sulamita nas bodas de Salomão do livro bíblico "Cântico dos Cânticos", ora Mary, rainha da Escócia, ou realçando a aura erótica das noivas africanas. Outras vezes aparece coroando o poder e a majestade seculares de reis e rainhas, ou a autoridade refletida nos adornos de cabeça das mais diversas tribos, e na mais dispersa distribuição geográfica.



● Foto8. Gargantilha em ouro amarelo, diamantes e peridotos, de Wanda Gontijo. Vancox.





● Foto 9. Broche em ouro amarelo, diamantes e água-marinhas, de Wanda Gontijo. Vancox.



O contexto histórico foi criando novos repertórios e estilos, à medida que as descobertas, conquistas e o progresso técnico possibilitavam a construção de novas formas, ampliando e alterando assim o uso e a função dos adornos. Durante as conquistas de Alexandre, o Grande, por exemplo, graças à descoberta de novas minas de ouro, as jóias espalharam-se por toda aquela próspera classe média; as jóias bizantinas refletiam todo o cristianizado império com promessas de imortalidade, estampadas nas figuras de Cristo, da Virgem e dos pavões, aves símbolos do paraíso, enquanto a joalheria gótica assumiu alta significação pessoal, trazendo inscrições que enalteciam o amor e a mulher, o conceito de cortesia e cavalheirismo próprio da cultura da Idade Média.

As mudanças nos hábitos e costumes, principalmente do vestuário, com o qual a jóia sempre esteve em estreita relação, também alteraram seu uso, seja como um meio de realçar a roupa, recobrimdo pesados veludos e brocados ou o próprio corpo, valorizado pelos ideais da Renascença, decorando os cabelos, colo e braços, então descobertos.

Sem uma função fundamental, a jóia pode falar de muitas coisas ao mesmo tempo, por uma linguagem geral, que nas suas variações marcam e identificam os mais diversos eventos, registrando e incorporando significados simbólicos pelas mais variadas representações. Em forma de insígnias, de ordem ou relíquias, o adorno tem na jóia comemorativa vínculos que se ligam tanto à vida como à morte. A presença de cabelos e ossos de mortos era comum nas jóias nos períodos de grande baixa humana, provocada por pestes e guerras. Já a vida, desde o nascimento, poderia ter sua existência marcada pelas mais diferentes formas de comemorações.

A Rainha Vitória, por exemplo, mandou fazer uma pulseira com o 1º dente de cada uma das suas filhas.

A variedade e a vitalidade dos materiais utilizados em todos os tempos ligavam-se primeiramente à disponibilidade encontrada em cada contexto e à criatividade como cada cultura os aplicava, de acordo com sua sensibilidade, domínio técnico e percepção do mundo, caracterizando e refletindo a imagem de cada uma delas. Dentre a infinidade de materiais aplicados às jóias em todos os tempos, destacam-se as pedras que, em todas as culturas, vêm assumindo conceitos mágicos, conectados tanto à sua forma, quanto às suas cores, atribuindo-lhe poderes que se ocultam sob suas características e particularidades. Este elenco de símbolos, quase sempre inspirado em elementos dos reinos da natureza, vem, desde as jóias mais antigas, encontradas nos túmulos egípcios, como nas do oriente ou América do Sul, assumindo significados e poderes, apaziguando as forças da natureza, agindo sobre os males do corpo, ou ainda como proclamações, sendo oferecidas aos deuses nos rituais pagãos e nas jóias sociais, ligando o espírito ao terreno.

Independente do significado simbólico atribuído, vêm acompanhando a história da joalheria, refletindo mudanças no comportamento e na moda. Um reflexo dessas mudanças refere-se ao uso de pedras pela classe média- as classes ricas faziam uso diário - na passagem do século XVIII, quando, com a liberação das necessidades, ser e parecer igual iniciou a economia da circulação de bens, com aumento do supérfluo, que trouxe mudanças no comportamento pessoal e um maior individualismo (ROCHE, 2000)

Durante muito tempo, o uso de jóias esteve limitado à realeza e ordens religiosas, pela aplicação de leis que, desde o século XII, restringira seu uso. Na Renascença foi deixando de ser símbolo de casta, mas ainda era da distinção de classes e marcas de privilégio. Somente com a expansão da indústria deixou de ser prerrogativa dos ricos e poderosos.

O século XIX, a não ser pela Art Nouveau, não registrou mudanças significativas na história da joalheria. Ao contrário, o século XX, afetado por duas grandes guerras e os efeitos da ruptura social daí decorrentes, ditou a produção de objetos de uso cotidiano, com o uso e a aplicação de novos materiais como acrílico e plásticos e os inusitados, como palha, penas e conchas. Com o ressurgimento e popularização das artes neste século, a demanda por jóias de alto valor intrínseco foi cedendo lugar a uma variedade de objetos, agora supridos pelos centros de produção em massa da indústria. Seu desenvolvimento misturou-se às artes, às tendências de moda e ao jeito informal de se vestir que a liberdade individual permitia. Hoje, há uma expansão das jóias artesanais e experimentais, rasgadas, amassadas e irregulares, dentre a grande variedade que pode ser encontrada. O mercado tem sido suprido com objetos artesanais - ou que envolvem artesãos nos estágios intermediários da produção - e avançada tecnologia que permite os acabamentos mais sofisticados.

Portanto, a conjugação da tecnologia, da arte e da artesanaria escreve a história da jóia que, se hoje perdeu muito de sua significação primitiva, permanece como objeto de prestígio e distinção, cujo fascínio pode derivar tanto de sua beleza ou valor intrínseco, quanto dos valores simbólicos e culturais que carrega.



Foto 10. Anéis em ouro branco, diamantes e, à direita água-marinha, e à esquerda turmalina rosa, de Wanda Gontijo. Vancox.



Fatores na Configuração do Produto

Configurar um produto supõe articular diferentes dimensões da realidade social, uma variedade e complexidade de fatores que congregados vão criar uma metáfora que acaba expressando os significados e conteúdos do contexto do produto (RODRIGUEZ, 1998).

De diversas ordens, estes fatores podem ser classificados, (QUARANTE, 1994) em culturais, referindo-se aos hábitos, culturas e religião, históricos e tecnológicos, ligados aos fatos históricos e à genética técnica; sociais, relativos aos signos, símbolos e à moda; harmônicos, que compõem a sintaxe dos elementos dos produtos e, os funcionais que dizem respeito à sua forma e à sua função. O arranjo desses fatores vai depender, não só dos requerimentos específicos, inerentes à natureza do produto, como da movimentação dos contextos, que requer uma contínua inovação e diversificação dos objetos, para se adaptar às novas demandas e necessidades dos seus usuários. Facilitada pelas inovações e transformações no processo de industrialização, a diversidade de objetos vai aumentando à medida que o mercado se divide em nichos, e o consumidor cada vez mais os quer de especificações variadas. A escolha vai depender



Foto 11. Anel em ouro amarelo, diamante e água-marinha, de Wanda Gontijo. Vancoc.



275



Foto 12. Projeto de conjunto em ouro Branco, topázio azul e diamante branco, de Carla Abras. Séculos Jóias.



de até que ponto este produto se conecta com as pautas do grupo a que se destina. O caráter dinâmico desta relação faz acelerar o nascimento e a morte dos produtos, enquanto multiplica as necessidades que se vão tornando cada vez mais subjetivas, abrangendo um amplo conjunto de benefícios que os envolvem. (BAUDRILLARD, 1997). Esses benefícios, como uma espécie de linguagem, entra no código de referência do consumidor, respondendo às suas expectativas, distinguindo o produto dentre seus similares. Na esfera do consumo, essa diferença, seja na forma, na cor, na aplicação tecnológica ou de um novo material torna-se a função distinta do produto, quando ele ganha sentido como o signo ou o status do seus usuários. Os objetos não são, portanto, apenas portadores de uma função, mas de uma informação que se transmite através do seu valor simbólico. A diferenciação e o estilo de vida, como idéias centrais constituem o ponto de partida para a formação simbólica no desenvolvimento do produto. E os estilos de vida não são indicados mais pela pertinência a uma determinada classe, no sentido tradicional, mas pelo que se liga a atividades, interesses e opiniões comuns. Os usuários reunidos em valas comuns compõem nichos que são identificados pelos signos e valores que carregam. Essas "micro-culturas" encaminham tendências, que acabam tendo o mesmo valor e status social dos seus usuários. Projetados sobre os objetos, os elementos dessa espécie de linguagem - nem sempre possíveis de serem identificados com clareza - acabam traduzindo aspectos desses grupos e de seus contextos, como codificações sociais de sua identidade. Dessa natureza, como as normas, os ritos e os protocolos, a moda ganha destaque, como um jogo estético que diferencia e acentua um grupo étnico, social ou profissional.

Por outro lado, com a homogeneização trazida pelo aumento de circulação sem barreiras e sem controle das informações, veio também a necessidade de ser distinto. Isso levou o indivíduo a uma busca de auto expressão e identidade que se podem revelar na aparência, e através dos seus bens culturais (BORDIEUX, 1987).

"No âmbito da cultura de consumo, o indivíduo moderno tem consciência de que se comunica não apenas por meio de suas roupas, mas também de sua casa, mobiliários, decoração, carro e outras atividades que são interpretadas e classificadas em termos de presença e falta de gosto." (FEATHERSTONE, 1995).

A mundialização trouxe com ela a necessidade de se destacar, conduzindo e dando relevo à diversidade (SOUZA, 2000). Em vez da uniformização e homogeneização dos produtos, a diferenciação, definida pelo arranjo dos fatores do contexto que vão compor a sua forma e aparência. *"Nosso estilo de vida nos identifica com um grupo, amigos, vocabulário, modo de vestir e escala de valores, que condiciona parte de nossos atos, fazendo com que sejam rejeitados de nossa esfera pessoal aquilo que não corresponde ao modelo projetado ou lhe é dissonante."* (QUARANTE, 1994).

É neste cenário, marcado pelo esgotamento dos bens padronizados, que cresce a importância dos sistemas de produção flexível e surgem os desafios para a indústria, qual seja, produzir em massa produtos que pareçam exclusivos e façam as pessoas sentirem-se únicas. É aí também que o design ganha destaque para conceber produtos cada vez mais diferenciados e customizados, de alto valor agregado. É na agregação de valor de um produto que a diversidade material e cultural de um contexto ganha relevo. Encaminhada pelas tendências esta diversidade cria múltiplas possibilidades de exploração formal, técnica e material, além de permitir resgatar e variar com nova feição significados étnicos e tradições, mantendo assim inovação em permanente diálogo com a tradição.

A configuração de um objeto de adorno compreende, além do que é comum às outras categorias de objetos, elementos quantitativamente intangíveis, o que dá aos requisitos estéticos formais maior destaque, tornando-os aspectos de sua função, esta entendida não apenas como uso, mas como o propósito ao qual o objeto vai atender no seu sentido mais amplo. Na composição formal de um objeto de adorno, os elementos simbólicos terão maior destaque que a exigência funcional ou de uso de um objeto técnico. (BURDEK, 1994).

Sujeita às oscilações do gosto e da moda, a concepção de uma jóia necessita analisar as forças culturais e ideológicas que vão dar forma e conteúdo ao produto e como estas se relacionam com os fenômenos do consumo e da moda, variáveis que entram de cheio na orientação do projeto.

Como "objeto-arte" para onde afluem aspectos que refletem as influências e tendências da moda, ampliada pelos meios de comunicação, as jóias acabam se integrando aos demais objetos de consumo. Como exemplo, destaca-se a aliança, *"objeto feito para durar e testemunhar a permanência de uma relação"* e que hoje já se integra ao universo de consumo e à constelação da moda, sendo trocado e renovado como relação personalizada. (BAUDRILLARD, 1997).

Embora em alguns produtos a aparência seja apenas um elemento, na jóia, ela representa seu efeito e uso, a dimensão comunicativa que expressa uma qualidade ou característica. Esta aparência resulta da soma dos fatores objetivos e subjetivos do contexto que contribuem para que, além da qualidade técnica, a jóia adapte-se confortável e harmoniosamente ao corpo como uma



277



● Foto 13. Anel e brincos em ouro, turmalinas azuis e diamantes, de Christo Kiffer. Christo Kiffer Design.

extensão de si mesmo. E como qualquer outro produto, a sua concepção deve ser entendida como um ofício de projeto que tem como competência não só as questões de sua conformação, mas de criação e projeção orientadas pela metodologia do design industrial, e *"o design industrial, contrariamente ao que achavam seus precursores, não é uma atividade autônoma. Ainda que suas opções pareçam livres - e às vezes o são - sempre se trata de opções no contexto de um sistema de prioridades estabelecidos de maneira bastante rígida"* (MALDONADO, 1977). Portanto os métodos e procedimentos no projeto de uma jóia estão como em outro produto sujeitos às variáveis do contexto, às leis e dinâmicas do mercado usuário.



Design de Jóias, um Projeto em Construção

A necessidade de se destacar em meio à crescente e acirrada competição dos mercados tem levado as empresas a buscar o design como elemento estratégico de diferenciação de seus produtos. O setor joalheiro, em particular, tem procurado na inovação um dos elementos indispensáveis ao design, a ação estratégica para se manter em sintonia com as mudanças, acompanhar as movimentações do mercado, as tendências da moda e da produção mundial. As instituições representativas do setor já têm clareza quanto ao seu papel como fator de competitividade de seus produtos, embora dentro da cadeia produtiva o design atue em pontas diferentes, variando de acordo com o entendimento que cada empresa tem da atividade. E esta, ainda não se integra totalmente ao processo produtivo, relacionando-se mais com as tarefas internas do desenvolvimento do projeto, que muitas vezes restringe-se apenas ao desenho artístico do objeto, oscilando, assim, entre a arte e o design.

Ainda que o entendimento que as empresas têm do seu papel no processo de desenvolvimento do produto seja um tanto enevoada, já se percebe que o design de jóias começa a ganhar crescimento e configuração própria, passando a ser entendido com um ofício de projeto do design industrial.

Em vez de apenas reproduzir modas e estilos vive o amadurecimento que orienta os próprios caminhos e aponta para um produto, cuja imagem já se integra à própria realidade e reflete a bagagem cultural que irá fortalecer a criação própria. O nosso produto de joalheria, que já foi muito mais copiado, principalmente do europeu, escondeu-se durante muito tempo sob a tese que design de jóias tem de ter design clássico. Isto inibiu a construção de uma identidade que, alinhada aos valores materiais e iconográficos do próprio contexto, pudesse sustentar a reputação de um produto apoiado no eixo da tradição, que diferencia o original do comum.

Com a liberdade formal que aos poucos foi ocupando o lugar das formas clássicas e incorporando novos materiais, a jóia passou a ter nova feição. Esta liberdade, associada às inovações tecnológicas e à criatividade permite a produção de uma variedade de objetos, assegurando ao consumidor a liberdade de escolha, sob a qual repousa a personalização dos diversos grupos que hoje compõem o mercado usuário dos produtos de consumo.

A diversidade de soluções resultante do entendimento que as razões da procura por um determinado item estão intimamente relacionadas à variedade e exclusividade dos produtos, tem crescido exponencialmente, conforme as empresas constroem e introduzem conceitos novos, adaptam e incrementam refinamentos, tornando o seu produto diferenciado. Esta flexibilidade permite a cada uma delas desenvolver uma forma particular de abordar e resolver seus problemas, construindo a práxis que se apoia na sua bagagem teórico cultural, nos seus métodos projetuais e nas pautas dos contextos onde elas estão inseridas. Assim, a estética final do produto é definida pela forma como cada empresa articula as habilidades e competências técnicas específicas com as idéias e *insights*, que nascem das diferentes visões das áreas e atores envolvidos no processo. E é nessa articulação que se destacam a importância do design e do projeto.



Na concepção e desenvolvimento de um produto como a jóia, com a complexidade própria do setor, o projeto, nas suas várias etapas e representações, é que vai dar unicidade às competências e objetivos, reduzindo a lacuna que existe entre o produto concebido-virtual-e o produzido-produto real.

As empresas do setor joalheiro mineiro vêm ganhando aspectos de qualidade e identidade, evoluindo para o desenvolvimento de produtos conceitualmente diferentes dos que vinham sendo feitos.

Mesmo alinhadas numa mesma direção e partindo de uma linguagem comum, cada empresa, nas suas variações, cria vocabulários diferentes e especializados à medida que reflexiona os estilos de vida com a moda e o avanço tecnológico.

A inovação, que tem sido uma estratégia comum adotada por elas, varia apenas na oportunidade, que tanto pode surgir da tecnologia como da aplicação de um novo material ou de uma demanda específica, acarretando alterações no produto básico (paradigma), ou introduzindo mudanças incrementais, parciais ou radicais nos produtos passíveis de mudanças.

Quando se inclinam para a troca ou adoção de novos materiais, ainda que partam dos mesmos, nos casos aqui ilustrados as gemas mineiras, as diferentes soluções encontradas para a sua aplicação destacam a linguagem comum que orienta a maneira particular como cada empresa aborda seus problemas de desenvolvimento de produtos. Da mesma forma que a moda, que aos poucos foi saindo do gueto *fashion* e chamando a atenção de outros centros, a jóia mineira também evolui para um produto conceitualmente diferente e destaca aspectos de uma qualidade e identidade, fora dos estereótipos e da generalização. Numa visão geral e acrítica, os produtos exemplares aqui destacados ilustram que a prática do design pode levar à significação de novas realidades, e que sem a esterilidade imitativa das cópias, o produto acaba projetando a identidade empresarial que se apoia no próprio patrimônio cultural e material. E que um mesmo contexto pode oferecer múltiplas possibilidades de agregar valor aos produtos. As gemas, independente da sua durabilidade, valor intrínseco, ou dos significados simbólicos a elas atribuídos, podem criar novos estilos, dar um toque diferenciado ou exótico aos produtos, além, do que é fundamental, refletir neles o contexto do qual derivam e onde são concebidos.

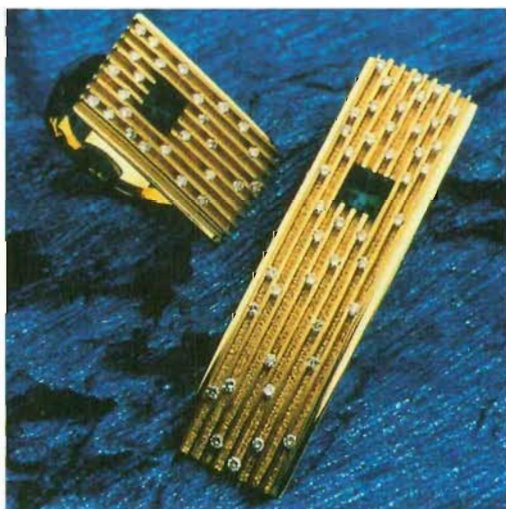


Foto 14. Conjunto de anel e pingente / Broche em ouro amarelo com diamantes e turmalinas verdes. Christo Kiffer. Christo Kiffer Designs.

Bibliografia Consultada

- ALEXANDER, Christopher. Ensayo sobre la Síntesis de la Forma. 1969.
- ANAIS/Forum Internacional Design e Diversidade Cultural. Florianópolis; Senai/Lbdi, 1995.
- BAUDRILLARD, Jean. Para uma Crítica da Economia Política do Signo. São Paulo: Martins Fontes, 1972.
- BAUDRILLARD, Jean. O sistema dos objetos. . São Paulo: Perspectiva, 1997.
- BAXTER, Mike. Projeto de Produto: Guia Prático para Desenvolvimento de Novos Produtos. São Paulo, Editora Blücher, 1998.
- BONFIM, Gustavo Amarante. Metodologia para desenvolvimento de projetos. João Pessoa. Ed. Universitário/ UFPB, 1995.
- BONSIEPE, Gui. Teoría y Practica del Diseño Industrial. Barcelona: Gustavo Gilli, 1979.
- BONSIEPE, Gui. Las Siete Columnas del Diseño. Havana. Oficina Nacional de Diseño Industrial, Instituto Superior de Diseño Industrial, 1993. (mimeo)
- BORDIEU, Pierre, A economia das trocas simbólicas. São Paulo: Perspectiva, 1987
- BURDEK, Bernhard E. Diseño. História, Teoría y Practica del Diseño Industrial. Barcelona: Gustavo Gilli, S.A, 1994.
- CAELEU, Jean e ZREIK, Khaldoun. Le communicationnel pour concevoir – Les objets intermédiaires de la Conception: Modélisation et Communication
- ERNEST, A; HEINIGER, Jean (coordenador). The great book of jewels. Lausanne: Edita S.A., 1974.
- FEATHERSTONE, Mike. Cultura de consumo e modernismo. São Paulo: Nobel, 1995.
- JEANJET, Alain. Les objets intermédiaires dans la conception. Elements pour une sociologie des processus de conception – Laboratoire Cristo –www. upmf-grenoble/cristo
- KAVOLIS, Vytautas. La Expression Artística: Un Estudio Sociológico. Buenos Aires: Amarrortu editores, 1968.
- LUX, Simonetta. Arte e industria, Firenze: Sansoni, 1973.
- MALDONADO, Tomás. El diseño industrial reconsiderado, definición, história, bibliografía. Barcelona: Gustavo Gilli, 1977.
- MOLES, Abraham A. Teoría dos objetos. Tradução de Luiza Lobo do original em francês. Rio de Janeiro: Edições Tempo Brasileiro. 1981.
- MUNARI, Bruno. O artista e design. Roma: Editori Laterza, 1976.
- OWEN, Charles. Considering Design Fundamentally. Design Processes Newsletter. Illinois Institute, Chicago, 1993, VS nº 03.
- PEARSALL, Ronald. A connoisseur's guide to antique jewellery. Todtri Productions Limited, New York, 1999. www.todtri.com
- Programa Gemas e Jóias - Deliberação CONECIT Nº 003/1999. Minas Gerais 16/09/99
- Caderno do Executivo/Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia
- Programa Tecnológico Setorial Gemas e Jóias - Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia/MG
- QUARANTE, Danielle. Éléments de design industriel. Paris, Polytechnica, 1994.
- ROCHE, Daniel História das coisas banais. Rio de Janeiro: Rocco, 2000
- RODRIGUEZ, Luis. Los Discursos Contemporáneos del Diseño. En Sintensis, ano 9 nº 27 Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Cidade do México. 1998. P.14 a 27
- SCARISBRICK, Diana. Jewellery Source Book. London: Quantum Books, 1998.
- SOUZA, Marília. Culture et Design: application de l'interculturalité à la conception et à l'évaluation de produits dans un environnement globalisé. L'Université de technologie de Compiègne, 2001.



Os Autores

A d r i a n a B o r r e l l i A c h t s c h i n

Professora do curso de Geografia e Análise Ambiental, Mestre em Geologia

UNI-BH - Centro Universitário de Belo Horizonte

Geóloga da GeoGeraes Ltda

adriana@geogeraes.com.br

A n t ô n i o C a r l o s P e d r o s a S o a r e s

Professor, Doutor em Geologia Econômica

Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais

Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa

pedrosa@igc.ufmg.br

A n t o n i o L i c c a r d o

Geólogo, Mestre em Gemologia

Doutorando em Petrologia – Universidade Federal de Ouro Preto

liccardo@degeo.ufop.br

A n t ô n i o L u c i a n o G a n d i n i

Professor, Doutor em Mineralogia

Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

gandini@degeo.ufop.br

C l a i t o n P i v a P i n t o

CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte

claiton@cprmbh.gov.br

C r i s t i a n e C a s t a ñ e d a

Engenheira Geóloga, Mestre em Gemologia

Doutoranda em Mineralogia Aplicada – Universidade de Brasília

kiki@gold.com.br

C u s t ó d i o N e t t o

CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte

custodio@cprmbh.gov.br

G a b r i e l d e O l i v e i r a P o l l i

Professor, Mestre em Gemologia

Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

polli@degeo.ufop.br

H a n n a J o r d t E v a n g e l i s t a

Professora, Doutora em Petrologia

Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

hanna@degeo.ufop.br

J o ã o E d u a r d o A d d a d

Professor, Doutor em Sedimentologia

Departamento de Ecologia e Recursos Naturais - Universidade Federal do Espírito Santo

eaddad@hotmail.com

J ú l i o C é s a r M e n d e s

Professor, Doutor em Mineralogia

Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

julio@degeo.ufop.br

M á r c i o B a s í l i o

Professor, Mestre em Gemologia

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG

e-mail: basilio@deii.cefetmg.br

M a r i a B e r n a d e t e S a n t o s T e i x e i r a

Coordenadora da Pós-Graduação

Escola de Design da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG

mbernadt@terra.com.br

M a r i a S í l v i a B a r b o s a

Professora, Doutora em Geofísica

Departamento de Geologia - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto

silvia@degeo.ufop.br

M á r i o C o n c e i ç ã o A r a ú j o

CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte

cprm@cprmbh.gov.br

M a u r í c i o F a v a c h o

Geólogo, Mestre em Geologia

Empresa Brasileira de Radiações – EMBRARAD

mfavacho@uol.com.br

R o s a M a r i a d a S i l v e i r a B e l l o

Pesquisadora, Doutora em Mineralogia e Petrologia

Laboratório de Inclusões Fluidas do Departamento de Mineralogia e

Geotectônica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

rosabello@uol.com.br

V i t ó r i a R é g i a P é r e s d a R o c h a O l i v e i r o s M a r c i a n o

Diretora do Museu de Mineralogia Prof. Djalma Guimarães, Doutora em Mineralogia

Pesquisadora Associada do Centro de Pesquisa Prof. Djalma Guimarães da UFMG.

museumin@pbh.gov.br

Gemas de Minas Gerais

Este livro foi produzido em setembro de 2001.

Textos compostos em Univers.

Fotolitos produzidos por Fotoprint Studio Gráfico.

Impressão, encadernação e acabamento da Lastro Editora
em Papel Couché 150g/m² (miolo e cinta) e Supremo 300g/m² (capa).