

CORÍNDON NO BRASIL

OCORRÊNCIAS, MINERALOGIA, QUÍMICA E GÊNESE



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitor

Dirceu do Nascimento

Vice-Reitor

Marco Antônio Tourinho Furtado

Pró- Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Newton Souza Gomes

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Antônio Gomes de Araújo

Vice-Diretor

Antenor Barbosa

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

César Chicarino Varajão



*EVOLUÇÃO CRUSTAL E RECURSOS
NATURAIS*

CONTRIBUIÇÕES ÀS CIÊNCIAS DA TERRA – SÉRIE D

TESE DE DOUTORAMENTO

Nº4

CORÍNDON NO BRASIL

OCORRÊNCIAS, MINERALOGIA, QUÍMICA E GÊNESE

Antonio Liccardo

Orientadora

Hanna Jordt Evangelista

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Ciências Naturais, Área de Concentração: Petrogênese, Recursos Minerais e Gemologia

OURO PRETO

2003

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas – <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br>
Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
Campus Morro do Cruzeiro s/n – Bauxita
35400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
e-mail – pgrad@degeo.ufop.br

Os direitos de tradução e reprodução são reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

ISSN 1677-4132

Depósito Legal na Biblioteca Nacional

Edição 1^a

Liccardo, Antonio

L698c Coríndon no Brasil – ocorrências, mineralogia, química e gênese/Antonio
Liccardo. Ouro Preto: UFOP, 2003.

xviii, 186p.: il. color. (Contribuições às Ciências da Terra, série D, vol. 4)

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento
de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais.

ISSN 1677-4132

1. Coríndon. 2. Geologia econômica. 3. Geoquímica 4. Gemologia. 5. Mineralogia I.
Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. II.
Título

CDU: 553.82

Agradecimentos

Desejo expressar meus agradecimentos às pessoas e instituições que fizeram parte desse trabalho, de maneira direta ou indiretamente.

- Dra. Hanna Jordt Evangelista pela orientação firme e pacífica.
- Dr. João Addad e Dr. Júlio César Mendes pela participação como profissionais - amigos e também pelas discussões e risadas em campo.
- Dr. Nelson Luiz Chodur pelo auxílio como especialista em coríndon.
- Dra. Ester Figueiredo pelas análises de INAA.
- Dr. César Chicarino Varajão por acreditar no valor das idéias.
- Dr. Márcio Aleixo Kahwage pelas conversas sobre gemas.
- Ricardo Touriño, pelas informações de produção.
- Gilberto Machado pela lapidação de amostras.
- Dr. Renaud Vochten, Dr. Jean Marie Dereppe, Dra. Claudette Moreaux, Dr. Vladimir Bermanec, Dr. Goram Kniewald e Dr. Ladislav Palinkas pelas conversas enriquecedoras durante as várias excursões.
- Craig Wilcox pelas amostras de coríndon da Ásia.
- A todos os co-autores dos artigos que fizeram cópias de segurança.
- Aos amigos de Ouro Preto, em especial os geólogos Rafael Romano e Leonardo Simões, a Prof^a Neide das Graças Souza e o especialista em imagens Ronald Péret.
- Ao CNPq pela bolsa de estudos e FAPEMIG pelo financiamento parcial dos custos de campo e análises.
- Aos laboratórios da UFOP, UFPR, UFMG e CDTN/CNEN pelo uso de seus equipamentos e instalações.

RESUMO

O presente volume reúne uma série de artigos que compilam os resultados do estudo das principais ocorrências de coríndon brasileiras distribuídas pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Santa Catarina, Tocantins e Mato Grosso do Sul. Vinte e nove ocorrências foram cadastradas, mas somente algumas apresentam ou já apresentaram alguma produção de gemas. Os mais importantes depósitos foram amostrados, investigados em termos de geologia e o coríndon foi caracterizado em detalhe em termos mineralógicos por diversas técnicas analíticas como microscopia óptica, microsonda eletrônica, microscópio eletrônico de varredura, ativação neutrônica, plasma, espectroscopia, análises termogravimétrica e termodiferencial, difratometria de raios X e análises gemológicas convencionais. Com a exceção de Peixe, em Tocantins, onde coríndon é encontrado em pegmatito alcalino, e Catingal, na Bahia, onde coríndon ocorre em gnaisses de fácies granulito, as outras ocorrências são depósitos sedimentares secundários onde rocha hospedeira inalterada não está preservada. Informações obtidas das duas ocorrências com coríndon na rocha hospedeira ajudaram a entender a origem do coríndon das outras localidades. De modo semelhante a Catingal, as ocorrências de Indaiá, Palmeiras, Sapucaia e Caputira, na região leste de Minas Gerais, estão todas situadas no mesmo contexto geológico de rochas metamórficas de alto grau, pertencentes ao cinturão de dobramentos neoproterozóico Araçuaí. As similaridades geológicas dessa área com a região onde os importantes depósitos de rubi e safiras de Sri Lanka são encontrados sugerem que novas ocorrências podem ser descobertas em Minas Gerais. O estudo dos depósitos de Minas Gerais também possibilitou entender o *modus operandi* do sistema deposicional que gerou os sedimentos colúvio-aluvionares onde coríndon foi concentrado, estabelecendo, assim, possíveis controles de prospecção para outras áreas, como em Barra Velha, Santa Catarina. Análises químicas para elementos traços, espectroscopia na faixa do UV-visível e a identificação das inclusões sólidas em amostras de coríndon de onze ocorrências mais importantes forneceram elementos adicionais para a caracterização e origem do coríndon. O estudo comparativo dos teores de Cr, Fe, Ti e Ga permitiu conclusões em relação à gênese do coríndon. Em Coxim, Mato Grosso do Sul, há indícios de origem associada a álcali-basalto. Em Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina a química corroborou a interpretação de cristalização em ambiente metamórfico, com exceção de Malacacheta, em Minas Gerais, onde uma origem metassomática não pode ser excluída. Concentrações anômalas elevadas de elementos como TR foram detectadas em alguns depósitos e puderam ser associadas a inclusões de monazita não completamente eliminadas durante os procedimentos de preparação de amostras. Análises gemológicas e físico-químicas em amostras dos depósitos selecionados indicam que, em alguns casos, um tratamento térmico adequado pode promover o melhoramento das gemas e, possivelmente, a viabilização econômica de depósitos. Minas Gerais e Bahia são os estados que apresentam o maior número de ocorrências e o melhor potencial para produção de rubi e safiras.

ABSTRACT

This volume embodies a set of articles compiling the results of the study of the main Brazilian corundum occurrences distributed over the states of Minas Gerais, Bahia, Santa Catarina, Tocantins and Mato Grosso do Sul. Twenty-eight occurrences are reported but in only a few there is or there used to be some gem production. The most important deposits were sampled, investigated in terms of geology and detailed mineralogical characterization on corundum was performed using several analytical techniques such as optical microscopy, electronic microprobe, electronic scanning microscopy, neutronic activation, plasma, spectroscopy, thermogravimetric and thermodifferential analyses, X-ray diffraction, and conventional gemmological analyses. With the exception of Peixe, Tocantins, where corundum is found in alkaline pegmatite, and Catingal, Bahia, where corundum occurs in granulite-facies gneiss, the other occurrences are secondary sedimentary deposits where no fresh host rock is preserved. Information obtained from the two occurrences with corundum in the host rock helped to understand the origin of corundum from the other localities. Similar to Catingal, the occurrences of Indaiá, Palmeiras, Sapucaia, and Caputira, in eastern Minas Gerais, are all situated in the same geological framework of high-grade metamorphic rocks belonging to the neoproterozoic Araçuaí Fold Belt. The geological similarities of this area and the region where the important ruby and sapphire deposits from Sri Lanka are found suggest that new occurrences might be discovered in Minas Gerais. The study of the deposits in Minas Gerais also enabled to understand the *modus operandi* of the depositional system, which formed the alluvial sediments where corundum was trapped, thus establishing possible search controls for other areas such as in Barra Velha, Santa Catarina. Chemical analyses for trace elements, spectroscopy in the range of UV-visible and the identification of solid inclusions on corundum samples from eleven major occurrences supplied additional elements for the characterization and origin of corundum. Comparison of Cr, Fe, Ti, and Ga-contents enabled conclusions concerning the genesis of the corundum. In Coxim, Mato Grosso do Sul, there are indications of an origin associated with alkali-basalt. In Minas Gerais, Bahia and Santa Catarina chemistry corroborated the interpretation of crystallization in a metamorphic milieu, with the exception of Malacacheta in Minas Gerais, where a metassomatic origin can not be excluded. Anomalous high concentrations of elements such as REE were detected in a few deposits and could be associated with monazite inclusions not completely eliminated during the sample preparation procedures. Gemmological and physico-chemical analyses in samples from selected deposits indicate that, in some cases, an adequate thermal treatment may promote gem enhancement and turn the economic production of gem-quality corundum viable. Minas Gerais and Bahia are the states with the largest number of occurrences and the greater potential for the production of ruby and sapphires.

Sumário

AGRADECIMENTOS	ix
<i>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</i>	<i>xvi</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i>	<i>xxi</i>
RESUMO	01
ABSTRACT	03
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE	05
CAPÍTULO 2 –	
GENERALIDADES	09
2.1 Coríndon	09
2.1.1 Introdução	09
2.1.2 O Mineral	09
2.1.3 Mineralogia e Cristalografia	10
2.1.4 Modelos Genéticos	13
2.1.4.1 – Metamorfismo regional	14
2.1.4.2 – Metamorfismo de contato	17
2.1.4.3 – Magmatismo básico	18
2.1.5 Coríndon no Mundo	19
2.1.6 Coríndon no Brasil	21
2.1.7 Coríndon em Minas Gerais	25
2.1.7.1 Campo Caratinga-Manhuaçu	26
2.1.7.2 Região de Malacacheta-Novo Cruzeiro	30
2.1.7.3 Região de Cláudio Campo-Belo	31
2.1.7.4 Outras Ocorrências	31
2.1.8 Considerações sobre tratamento térmico de coríndon no Brasil	32
CAPÍTULO 3 – OCORRÊNCIAS	39
3.1 Korund aus Brasilien	39
3.1.1 Einleitung	39
3.1.2 Derzeitige Situation	40
3.1.3 Aussichten	41
3.2 Ocorrências de Coríndon na Porção Leste de Minas Gerais	47
3.2.1 Abstract	47
3.2.2 Resumo	47
3.2.3 Introdução.....	47

3.2.4	Localização.....	48
3.2.5	Geologia da região.....	48
3.2.6	Análises realizadas	51
3.2.7	As ocorrências	51
3.2.7.1	Indaiá	51
3.2.7.2	Sapucaia	54
3.2.7.3	Caputira	54
3.2.7.4	Palmeiras	55
3.2.8	Resultados e discussões	56
3.3	Coríndon em Terrenos Granulíticos nos Estados de Santa Catarina (Barra Velha) e Minas Gerais (Indaiá), Brasil	59
3.3.1	Resumo.....	59
3.3.2	Abstract.....	59
3.3.3	Introdução.....	60
3.3.4	Metodologia utilizada	60
3.3.5	Contexto geológico.....	61
3.3.6	Depósitos	62
3.3.7	Características do coríndon	64
3.3.8	Inclusões	64
3.3.9	Composição química	65
3.3.10	Espectroscopia	66
3.3.11	Discussões e considerações finais	69
3.4	As Safiras nos Depósitos de Diamante Aluvionar da Região do Rio Coxim, Mato Grosso do Sul, Brasil.	71
3.4.1	Abstract.....	71
3.4.2	Resumo	71
3.4.3	Contexto.....	72
3.5	Coríndon do Estado da Bahia, Brasil.	77
3.5.1	Resumo	77
3.5.2	Abstract	77
3.5.3	Introdução	78
3.5.4	Localização	78
3.5.5	Coríndon de Catingal	80
3.5.6	Coríndon de Lajedinho	81
3.5.7	Coríndon de Paraguaçu.....	81

3.5.8 Outros depósitos na Bahia	82
3.5.9 Considerações Finais	83
CAPÍTULO 4 – DEPÓSITOS E ORIGEM	85
4.1 Coríndon em Minas Gerais: Considerações sobre a origem e depósitos secundários	85
4.1.1 Abstract.....	85
4.1.2 Resumo.....	86
4.1.3 Introdução.....	86
4.1.4 Localização.....	87
4.1.5 Geologia e gênese do coríndon.....	89
4.1.5.1 Região de Caratinga-Manhuaçu.....	89
4.1.5.2 Região de Malacacheta.....	93
4.1.5.3 Região de Cláudio-Campo Belo.....	95
4.1.6 Os depósitos de coríndon.....	96
4.1.7 Fatores determinantes da deposição.....	99
4.1.8 Considerações finais.....	100
CAPÍTULO 5 – ANÁLISES E RESULTADOS	101
5.1 Coríndon no Brasil - Química, Inclusões, Espectroscopia e Aspectos genéticos	101
5.1.1 Abstract.....	101
5.1.2 Introdução.....	102
5.1.3 Metodologia.....	105
5.1.3.1 Seleção e preparação de amostras.....	105
5.1.3.2 Métodos analíticos.....	106
5.1.4 Resultados	109
5.1.4.1 Química	109
5.1.4.2 Espectroscopia UV-Visível.....	112
5.1.4.3 MEV/EDS.....	115
5.1.5 Discussão.....	118
5.1.6 Considerações finais.....	122
CAPÍTULO 6 – GEMOLOGIA	123
6.1 Rubi e safiras de Minas Gerais, Brasil	123
6.1.1 Abstract.....	123
6.1.2 Introdução.....	123
6.1.3 Histórico.....	124

6.1.4	Localização e acesso.....	124
6.1.5	Contexto geológico regional.....	125
6.1.6	Características dos depósitos.....	127
6.1.7	Métodos de extração.....	128
6.1.8	Amostras e análises.....	128
6.1.9	Resultados e características.....	129
6.1.9.1	Malacacheta.....	129
6.1.9.2	Indaiá.....	130
6.1.9.3	Sapucaia.....	130
6.1.9.4	Palmeiras.....	131
6.1.10	Discussão.....	134
CAPÍTULO 7– CONSIDERAÇÕES FINAIS.....		143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		147
APÊNDICE 1.....		151
	Aspectos geoquímicos em safiras da região de Indaiá	153
	Geoquímica em amostras de coríndon do Brasil.....	154
	Caracterização e origem do coríndon de Barra Velha, Santa Catarina.....	158
	Identificação de fases hidratadas em coríndon no Brasil.....	159
	Elementos-traços em coríndon como indicadores de sua origem.....	160
	Aspectos geoquímicos na cor de rubis e safiras do Brasil.....	161
	Gênese de coríndon em terrenos metamórficos de alto grau, região de Catingal, Bahia.....	162
	Elementos terras raras em coríndon de Minas Gerais.....	164
	Coríndon de Cláudio e Campo Belo, sudoeste de Minas Gerais.....	165
	Depósitos de coríndon na faixa Caratinga-Manhuaçu, Minas Gerais.....	166
	Química comparada de cinco ocorrências de coríndon em Minas Gerais.....	167
	Caracterização preliminar da safira de Sapucaia, em Minas Gerais.....	168
	Caracterização e química preliminares do coríndon de Conceição do Mato Dentro, MG.....	169
	Tratamento térmico em coríndon: situação atual e perspectivas no Brasil.....	171
	Coríndon no Brasil – versão em português de Korund in Brasilien.....	172
APÊNDICE 2.....		175
	Descrição das principais técnicas utilizadas.....	177
	Coordenadas das principais ocorrências estudadas.....	185
FICHA DE APROVAÇÃO		187

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E ESTRUTURA DA TESE

Apesar da grande tradição e produção de minerais-gemas no país, o coríndon é ainda pouco conhecido no Brasil. Um dos escopos desse trabalho é o de reunir as informações conhecidas a respeito desse material no território brasileiro, incluindo informações informais obtidas no mercado de gemas e setores ligados a garimpos ou pequenos prospectores, uma vez que boa parte das ocorrências não apresenta lavra regularizada.

Com as pesquisas inicialmente concentradas no leste do Estado de Minas Gerais, a busca de informações para possíveis comparativos e associações genéticas conduziu os estudos a ocorrências em outros estados do Brasil, ampliando consideravelmente o volume de dados obtidos. O decorrer dos trabalhos sugeriu a realização de uma espécie de *dossier* sobre o coríndon brasileiro, sua origem e suas possibilidades como material gemológico. Mesmo longe de abranger todas as ocorrências e de serem completos, os estudos sobre depósitos de coríndon, a caracterização do mineral podem contribuir para o desenvolvimento desse setor, numa época em que a produção de minerais-gema no Brasil está aquém da demanda, e a tecnologia para tratamento de materiais gemológicos revela novas possibilidades a cada momento.

Somente durante a realização desse trabalho (1999-2003), surgiram pelo menos cinco novas ocorrências (Palmeiras, Sapucaia, Campo Belo, Catingal e Franca), o que é um indício do grande potencial do território brasileiro para a produção de rubi ou safiras. As novas descobertas muitas vezes não saem do estágio inicial por desconhecimento do material, por se tratar de garimpos clandestinos ou por dificuldades de mercado. O simples levantamento de dados sobre o local de origem de uma gema, via de regra é a primeira grande dificuldade, uma vez que num mercado informal rubi e safiras podem ser de qualquer lugar. As amostras utilizadas nesse estudo foram coletadas diretamente dos depósitos ou obtidas com garimpeiros no local de ocorrência, o que permitiu uma boa associação com dados de campo.

A estrutura utilizada na apresentação dos dados para esse volume de tese está fundamentada em publicações que ocorreram durante os trabalhos. Não é, portanto, uma leitura linear usualmente utilizada em teses, o que ocasiona por vezes uma certa sobreposição de informações. Outro fator que deve ser tomado em consideração é o cronológico, uma vez que os artigos foram gerados e publicados em

diferentes etapas da pesquisa, com uma densidade de informações maior e mais expressiva nos últimos capítulos, decorrentes de análises mais apropriadas.

O acompanhamento na coleta gerou a possibilidade de cruzar informações detalhadas de campo com resultados de análises das amostras, o que trouxe grandes subsídios para a compreensão da gênese desse mineral. Sendo a maior parte das ocorrências de origem colúvio-aluvionar, não só no Brasil, mas em todo o mundo, esse conjunto de detalhes torna-se fundamental também para a definição de controles prospectivos.

O conjunto de publicações, mesmo que resumidas ou pouco expressivas algumas vezes, permitiu a divulgação da pesquisa, principalmente em congressos, o que acarretou novas informações sobre outras ocorrências. Além disso, algumas dessas publicações de menor porte foram colocadas nos apêndices por representarem as únicas informações divulgadas de certas ocorrências.

O texto composto de nove publicações foi estruturado em sete capítulos de modo a oferecer uma seqüência lógica sobre o coríndon, suas ocorrências no Brasil, suas possíveis origens geológicas, a caracterização desse material e suas possibilidades de aproveitamento como gema. Outros textos em apêndice, apesar de resumidos, são complementares ao assunto.

O capítulo dois, que já foi publicado como capítulo onze do livro Gemas de Minas Gerais (Ed.SBG), não se apresenta nos moldes estritamente acadêmicos em função de que esse livro teve como finalidade a divulgação científica para a comunidade em geral. Assim, muitas vezes citações bibliográficas em excesso foram evitadas, fotografias não são chamadas no texto e a própria linguagem teve de ser adaptada.

O capítulo três, composto por cinco artigos, descreve as principais ocorrências nos estados de Minas Gerais, Bahia, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul, traçando alguns comparativos sempre que possível. As estruturas de cada artigo são diferentes conforme o periódico a que foi destinado e, em relação ao artigo publicado em alemão, uma versão em português é oferecida em apêndice.

O capítulo quatro tece considerações sobre os depósitos secundários de coríndon em Minas Gerais e o mecanismo de formação desses depósitos, tendo-se em conta os possíveis modelos genéticos. Esse capítulo mostra certas condições geomorfológicas cujo conjunto pode ser aplicado como controle na prospecção de coríndon em algumas regiões.

O capítulo cinco apresenta os resultados das principais análises a que as amostras foram submetidas e traz também algumas das conclusões a que esses resultados conduzem. Essa bateria de ensaios realizados em onze ocorrências, representantes das cinco regiões do Brasil, mostra uma caracterização química, espectroscópica e descrição de inclusões, que dá uma visão panorâmica de boa parte do material obtido no Brasil.

O capítulo seis, versando sobre rubi e safiras de Minas Gerais, procura colocar em evidência aspectos gemológicos do coríndon, de modo a justificar os estudos anteriores e valorizar o material produzido. Rubi e safiras em território brasileiro podem ser produzidos sistematicamente e o conhecimento científico deve ser aplicado, tanto na prospecção quanto nos processos de tratamento termoquímico ou irradiação das gemas. Foi o conhecimento científico sobre as esmeraldas brasileiras, provando sua qualidade, que colocou o Brasil entre os maiores produtores do mundo. O mesmo potencial de produção existe para rubi e safiras no Brasil.

Finalmente, o capítulo sete mostra as principais informações obtidas nos vários trabalhos e que foram condensadas e apresentadas na forma de considerações finais. Complementando o conjunto, uma descrição sumária das principais técnicas analíticas empregadas e as coordenadas das principais ocorrências mencionadas nesse trabalho são acrescentadas no apêndice 2.

Em função da grande quantidade de rubi e safiras sintéticos produzidos por vários métodos, o apanhado de informações ora apresentado mostra-se um bom subsídio na identificação dessas gemas. Apesar de alguns indícios apontarem um bom potencial para tratamento térmico no coríndon de várias das ocorrências registradas, nenhum teste foi realizado a esse respeito.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

2.1 CORÍNDON * - Antonio Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista

2.1.1 - Introdução

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, rubi ou safira, 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 deste quadro.

A presença de rubi ou safira de boa qualidade no território nacional se reveste de particular importância, à medida que estas gemas, somadas às outras famosas gemas brasileiras, colocam o país em posição de destaque mundial como Província Gemológica.

2.1.2 O Mineral

A palavra “coríndon” tem sua origem incerta, podendo ter sido derivada de várias línguas, como do hindu *kurand*, do sânscrito *kuruvinda*, do 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, significando azul), tendo essa classificação surgido em meados de 1800 quando, a partir de artigos publicados em Londres, reconheceu-se o parentesco destas gemas até então considerados 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 espinélio e granada vermelhos, na classificação de carbúnculo (do latim *carbunculus*, carvão pequeno). Quase todo o conhecimento sobre gemas desta 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, sendo de 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 desta 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 destas regiões. No Renascimento, Alselm Boetius de Boot (1636) publica em Hannover o "*GEMMARVM ET LAPIDUM HISTORIA*", considerado por muitos a mais importante obra sobre gemas do século XVII. Nesta obra o autor descreve o rubi como carbúnculo e cita sua proveniência como sendo da Índia e Arábia. Encontra-se nessa obra a primeira citação da possibilidade de 'pedras' vermelhas não serem a mesma gema. Essa hipótese foi extremamente importante, já que mais tarde descobriu-se que granadas, espinélios e rubis são de espécies minerais completamente diferentes.

2.1.3 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 se trata de um rubi e outras colorações são 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). Este grupo 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 2.1).

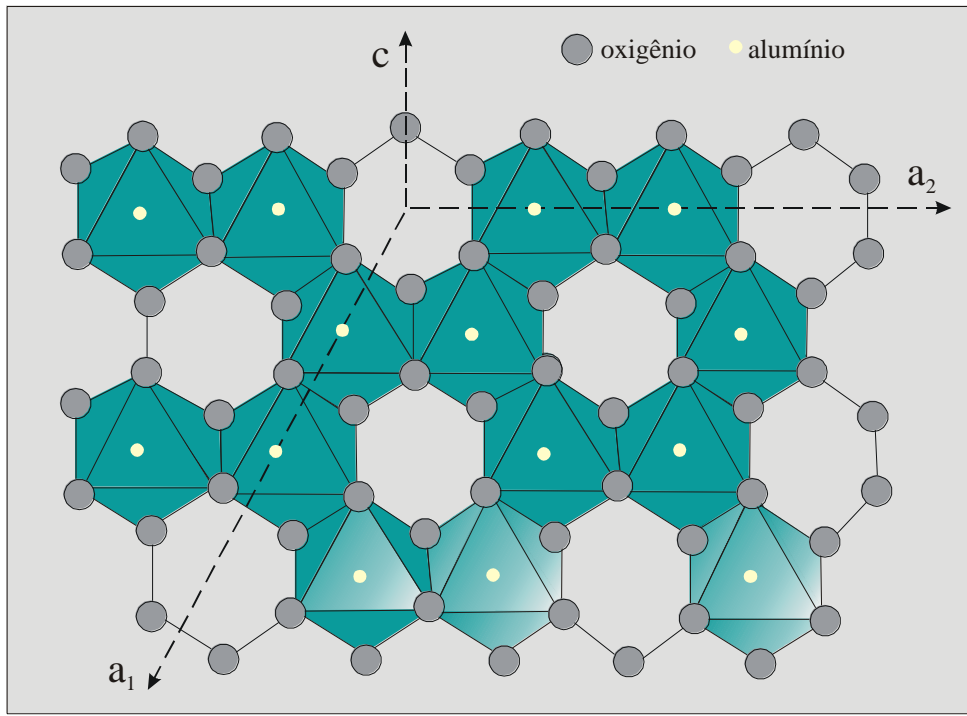


Figura 2.1 – Estrutura cristalina do coríndon, em relação aos eixos cristalográficos

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 esta classe de simetria existem sete formas simples:

- Pinacóide basal (0001), prismas hexagonais ($10\bar{1}0$ e $11\bar{2}0$), prismas dihexagonais ($hk\bar{i}0$), romboedros ($10\bar{1}1$ e $01\bar{1}1$), bipirâmide hexagonal ($hh\bar{2}hl$) e escalenoedro ditrigonal ($hk\bar{i}l$) positivo e ($kh\bar{i}l$) negativo.

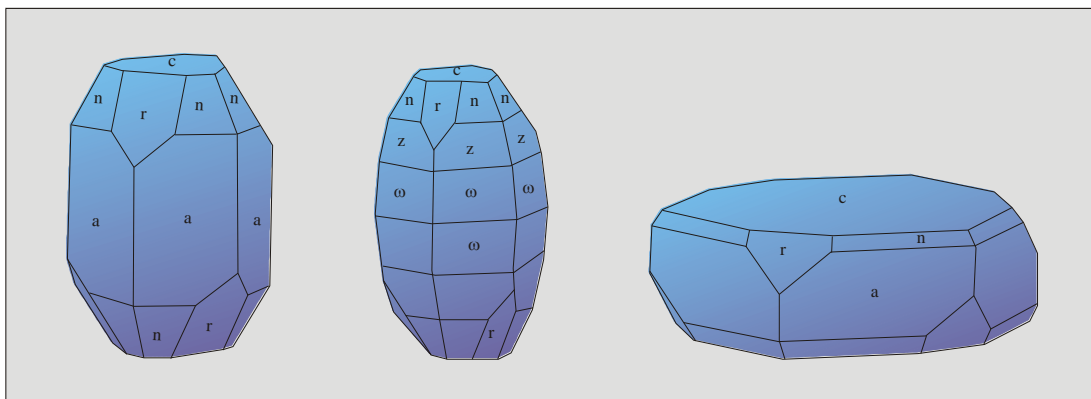


Figura 2.2 – Cristais de coríndon mostrando as formas fundamentais deste mineral : (c) pinacóide basal, (r) romboedro, (n, z, w) bipirâmides hexagonais e (a)prisma hexagonal . A figura central mostra o típico hábito em forma de barrilete do coríndon.

Os cristais de coríndon podem apresentar hábitos muito variados, dependendo da variedade, da procedência e outros fatores genéticos. Os cristais de rubi são comumente diferentes dos de safira. Os rubis da Birmânia, por exemplo, costumam cristalizar-se em 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 apresentar-se 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

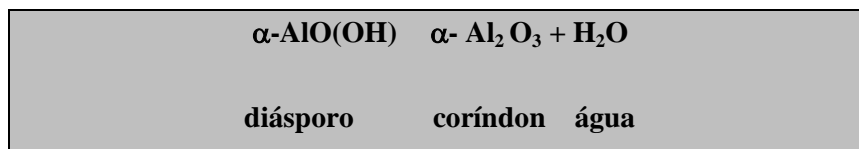
localidades, descobriu que nestes planos muitas vezes se detectava a presença de outro mineral identificado como boehmita (AlO(OH)).

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 estas 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 nestes índices. Assim, coríndon rico em ferro, como as safiras amarelas, verdes e azuis, tendem a apresentar índices de refração mais altos.

2.1.4 Modelos genéticos

A formação do coríndon acontece em ambientes ricos em alumínio e deficientes em sílica, sendo que esta segunda situação se reflete na ausência de quartzo nas rochas portadoras desse mineral. Uma das reações de formação de coríndon no metamorfismo progressivo é a partir do diásporo (Figura 2.3):



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 também com grau metamórfico). Deve-se ter em conta 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. Ainda, se

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 Mg e Fe.

O coríndon ocorre como mineral magmático somente em raras 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 2.1).

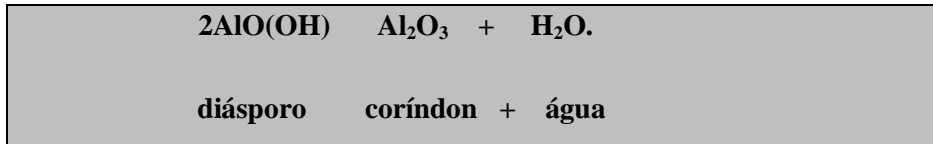
Quadro 2.1 – Representação esquemática das possíveis origens do coríndon.

Origem	Mecanismo	Protólito ou tipo
METAMÓRFICA	Metamorfismo regional (incluindo anatexia)	Bauxitas ou lateritas Paleossolos e sedimentos pelíticos Bauxitas cársticas/anfibolitos
	Metamorfismo de contato	-Isoquímico (termal) -Aloquímico (metassomático)
ÍGNEA	Magmatismo básico	-Sienitos e similares -Basaltos alcalinos

2.1.4.1 Metamorfismo regional

Neste item estão agrupadas as ocorrências de coríndon geradas por processos metamórficos *stricto sensu* em função dos diferentes tipos de protólitos.

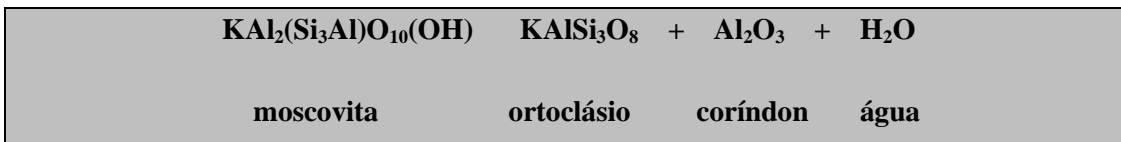
A – Metamorfismo de bauxitas e lateritas, como ocorre na ilha de Naxos, na Grécia, formando os famosos depósitos de esmeril. Uma reação que explica a formação do coríndon é:



Óxidos de alumínio hidratados são típicos de terrenos lateríticos e com bauxita, como em grandes áreas da Índia, África, Austrália e outras regiões tropicais.

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 (Figura 2.3). Em temperaturas superiores a 750°C o mineral reagente passa a ser a moscovita (Figura 2.3). Diásporo, além de gibbsita e bohemita são sugeridos como o material primário para formação de rubi em Mogok, na Birmânia (Kammerling *et al.*, 1994 *in* Levinson & Cook, 1994).

B – 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 álcali-feldspato e água, é produto da transformação da moscovita em temperaturas superiores a cerca de 750°C (Figura 2.3), conforme a reação:



Esta reação ocorre na ausência de quartzo, pois, em 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, mas numa estreita faixa de temperatura como mostra a Figura 2.3. Essa figura mostra também que a faixa de temperatura e pressão de formação do coríndon por metamorfismo da crosta vai de cerca de 500°C a 750°C e cerca de 7,5 a 17 kbar (\cong 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 desta região e que cinturões de

granulitos metassedimentares produzidos por colisão de placas são ambientes geológicos propícios para a formação desse mineral-gema.

A propósito destes estudos nos terrenos granulíticos do Sri Lanka, é interessante a observação de Munasinghe & Dissanayake (1981) que traçam um comparativo entre estas litologias e os cinturões granulíticos metassedimentares do Brasil, evidenciando similaridades na história geológica e no potencial para geração de coríndon.

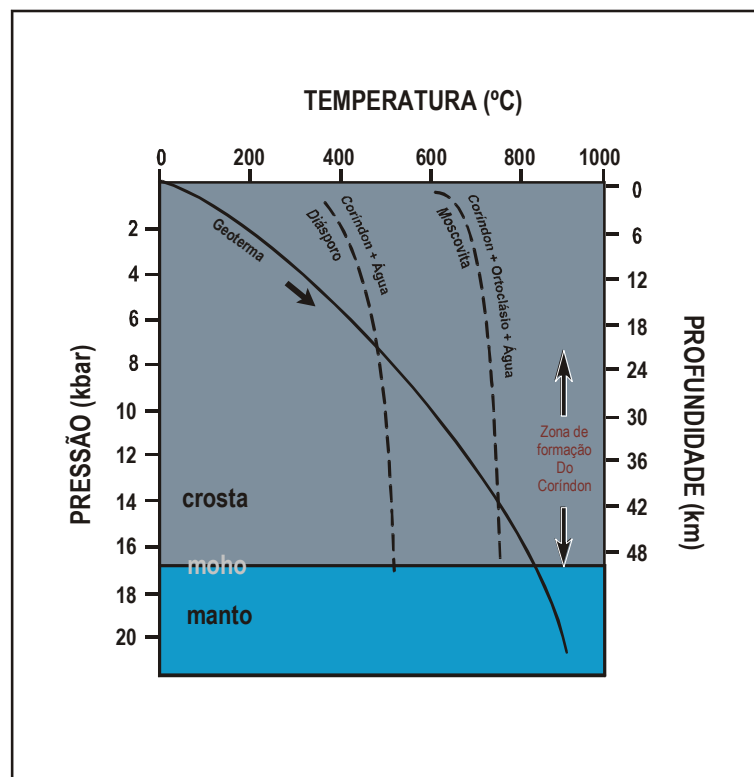


Figura 2.3 – Gráfico indicativo das condições de pressão e temperatura para a formação do coríndon a partir de hidróxido de alumínio (diásporo) ou da moscovita (Levinson & Cook, 1994).

C – 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 dolomítico. A mais famosa jazida de rubi no mundo, Mogok, na Birmânia (Mianmar), se enquadra neste contexto.

D – Anatexia - ainda durante o metamorfismo regional pode ocorrer anatexia, que é 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, havendo a formação de restitos com coríndon. Exemplo desta hipótese é a ocorrência de Ngorongoro, na Tanzânia.

2.1.4.2 Metamorfismo de Contato

A – Metamorfismo de contato termal (isoquímico) – o coríndon pode formar-se 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 esta incorporar fragmentos de encaixantes pobres em Si e ricas em Al. As ocorrências no Vietnam, Tailândia, Camboja e Austrália em álcali-basaltos são exemplos deste processo.

B – Metamorfismo de contato metassomático (aliquímico)

Neste 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 deste processo de dessilicificação:

- Dessilicificação no contato de rochas ígneas básicas/ultrabásicas com rocha ácida (pegmatóide). 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 e do Quênia foram formadas por este tipo de processo. Também no Transvaal existem ocorrências de coríndon em pegmatito zonado com porção interna rica em quartzo-feldspato, depois uma zona de feldspato e na borda externa feldspato/coríndon no contato com uma rocha encaixante básica (Figura 2.4).

- Dessilicificação através de rochas carbonáticas, que se baseia no mesmo princípio do processo anterior: são as mineralizações do tipo escarnito no contato com rochas ácidas, com formação de minerais cálcicos e coríndon. Exemplos deste processo são as jazidas do Sri Lanka e do Madagascar.

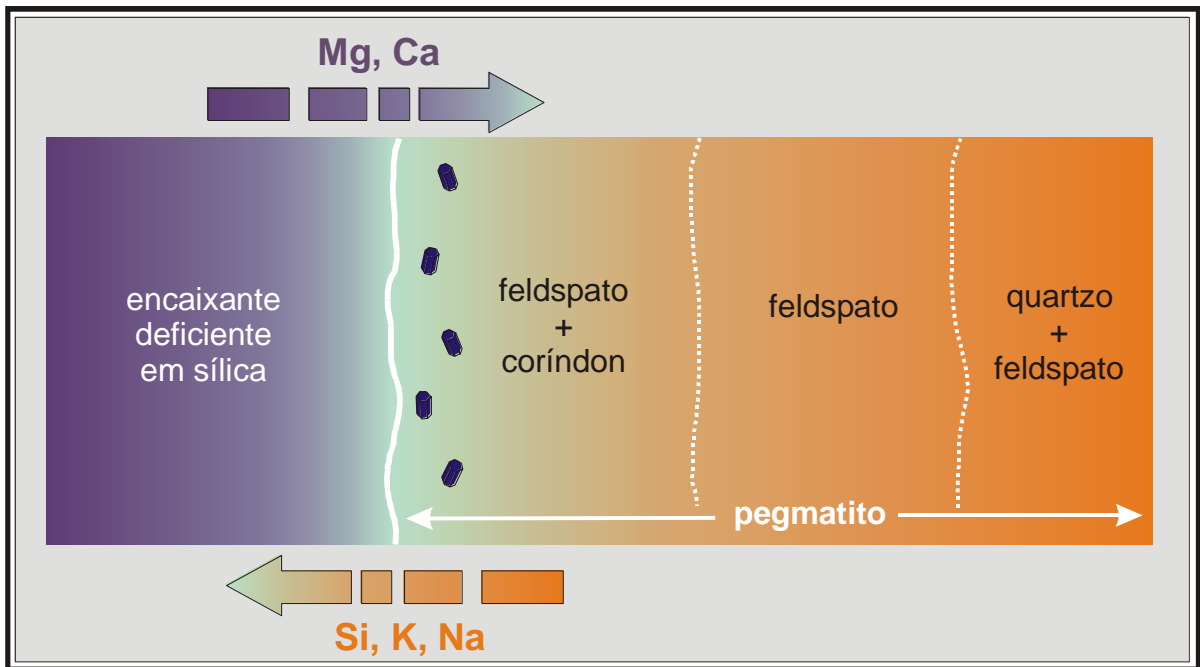


Figura 2.4 – Esquema representativo da gênese do coríndon por processo metassomático de dessilicificação. O esboço mostra o contato entre pegmatito e rocha encaixante deficiente em sílica, mostrando zonas de reação com formação do coríndon

2.1.4.3 Magmatismo básico

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). A origem magmática do coríndon é bastante polêmica. Aspectos geoquímicos e texturais do coríndon e a presença de inclusões incompatíveis com o basalto, indicam que esse mineral é instável neste tipo de magma, isto é, 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. O coríndon também ocorre em rochas ígneas, subsaturadas em sílica, tais como nefelina-sienitos, ou em rochas portadoras de xenólitos aluminosos.

2.1.5 Coríndon no Mundo

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. No novo milênio não somente o mercado demandará maiores quantidades, como também diferentes qualidades de coríndon deverão se tornar economicamente viáveis. A tecnologia e a aceitação de tratamentos de melhoria das gemas a partir dos anos 80 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 2.2 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.

O coríndon com qualidade gemológica é encontrado, na maior parte dos casos, em depósitos aluvionares e eluvionares. Dos dez maiores depósitos mundiais, apenas dois (Yogo Gulch, EUA e Kashmir, Índia) são explorados diretamente da rocha-matriz. Além dos depósitos aluvionares, coríndon é encontrado tanto em rochas ígneas quanto em metamórficas (ver item sobre modelos genéticos).

Quadro 2.2 - Maiores depósitos de coríndon-gema no mundo (Hughes, 1990)

<i>Localidade</i>	<i>Modo de ocorrência</i>	<i>Variedade</i>
Mogok, Birmânia (Mianmar)	O rubi é encontrado em aluviões e cascalhos derivados de calcários metamorfizados. As safiras se encontram em aluviões e cascalhos derivados de pegmatitos graníticos ou raramente sieníticos (Iyer, 1953*).	Rubi mais comum. Safira azul (também amarela, violeta, verde e astéricas ou com cambiamento de cor).
Chanthaburi (Tailândia) e Pailin (Camboja)	Rubi e safira em elúvios e aluviões derivados de basaltos alcalinos (Vichit, 1978*).	Rubi. Safiras azul, amarela, verde e “black star”.
Sri Lanka	Rubi e safira são encontrados em aluviões derivados de granulitos, pegmatitos, gnaisses granatíferos, skarns, cordierita gnaisses e rochas associadas (Heilmann & Henn, 1986*).	Todas as cores, exceto verde. Também variedades astéricas.
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 astéricas.
Queensland e New South Wales, Austrália	Safiras em aluviões e elúvios derivados de álcali-basaltos (Coldham, 1985*)	Safira azul, verde, amarela e “black star”
Jagdalek, Afeganistão	Rubi in situ em calcários dolomíticos metamorfizados, 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 contato de 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).

2.1.6 Coríndon no Brasil

Historicamente, a presença de coríndon no Brasil tem sido relatada desde os anos 30, mas sempre em ocorrências inexpressivas e sem viabilidade econômica. Na década de 60 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 explorada 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 2.5) 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 anti-econômicas.

Existem atualmente 29 ocorrências de coríndon registradas no Brasil (Figura 2.5), 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 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.

Ocorrências de Coríndon no Brasil



Figura 2.5 – 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 das 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 de pressão média e alta. No Rio de Janeiro e em Tocantins, ocorre coríndon azul associado a rochas alcalinas. Zimbres (1987) registra três ocorrências de coríndon azul com qualidade gemológica em Duque de Caxias, Rio de Janeiro, e associa a gênese destas ocorrências a pegmatitos alcalinos. Kitajima & Gaspar (1998) descrevem a presença de coríndon azul em corpo plutônico mesoproterozóico de rochas alcalinas miasquíticas (nefelina sienitos, sienitos, quartzo sienitos e granitos), no chamado Complexo Alcalino de Peixe, em Tocantins. Este corpo é cortado por pegmatitos e está em contato intrusivo com metassedimentos.

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 (Quadro 2.3) e as novas tecnologias de tratamento poderão possibilitar, em futuro próximo, a participação do Brasil também no mercado dessas gemas.

Quadro 2.3 – 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
Claudio	MG	Aluviões e Colúvio	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
Coxim	MS	Aluviões	Azul, amarelo e verde	Alta	Não
Franca	SP	Aluviões	Vermelho	Não	Não
Peixe	TO	Pegmatito e rochas alcalinas	Azul	Baixa	Não
Cannaã	RJ	Pegmatito e Rochas alcalinas	Azul e cinza	Não	Não
Lajedinho	BA	Rochas metamórficas	Vermelho, rosa	Média	Não
Catingal	BA	Rochas metamórficas	Castanho, verde, amarelo	Baixa	Não
Paraguaçu	BA	Aluviões e Colúvio	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, castanho	Média	Não
Patos	PB	Pegmatito	Azul	Baixa	Não
Gurupi	PA	Aluviões	Vermelho	Alta	Não
Itaituba	PA	Aluviões	Cinza	Não	Não

2.1.7 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 2.6). 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.

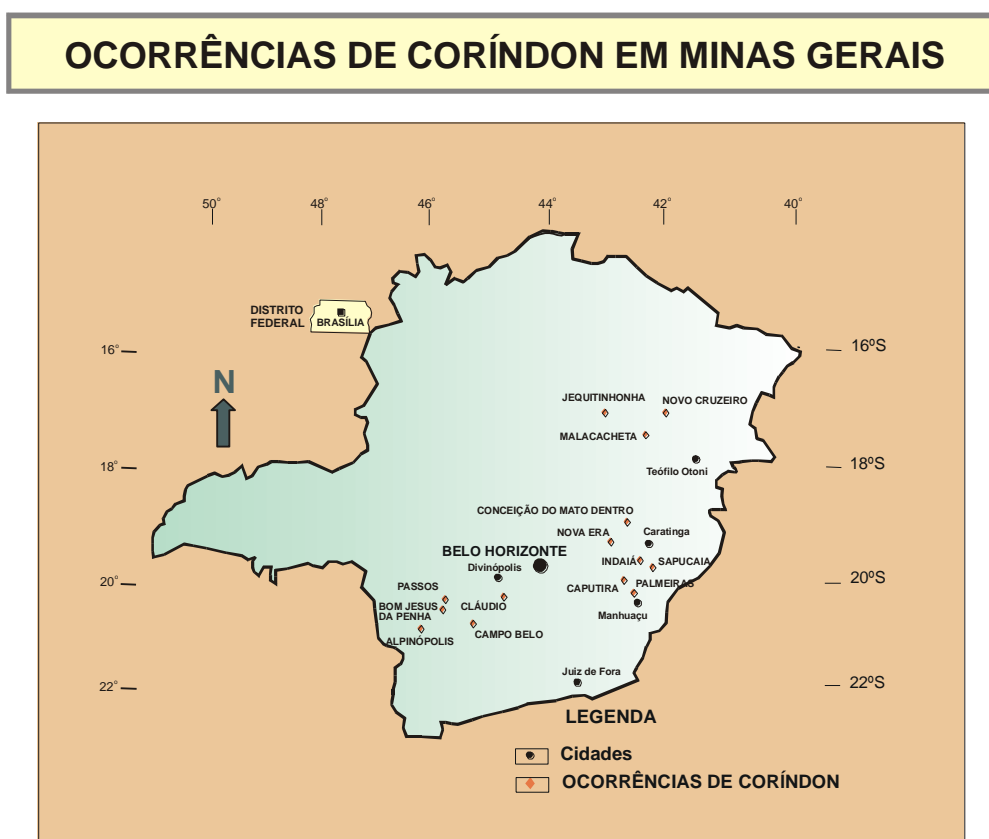


Figura 2.6 – Mapa de Minas Gerais com a localização das ocorrências de coríndon conhecidas.

O principal campo, Caratinga-Manhuaçu, por concentrar o maior número de ocorrências, permite um estudo mais detalhado 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 através de correlações químicas e do estudo de inclusões. Estudos comparativos dos depósitos da faixa Manhuaçu-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.

2.1.7.1 Campo de Caratinga-Manhuaçu

Nesta região ocorrem litologias pertencentes a terrenos metamórficos de médio até alto grau, como gnaisses, granulitos e charnoquitos. Os depósitos de coríndon (secundários) se encontram em terrenos gnáissicos-migmatíticos com presença eventual de rochas granulíticas, além de inúmeros corpos pegmatíticos que entrecortam toda a região.

Esta região tem sido alvo de diversos estudos e interpretações, tendo recebido variadas denominações locais e regionais. Pedrosa-Soares *et al.* (1994), englobam a região estudada dentro dos Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. Trabalhos recentes dataram esses complexos como do 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).

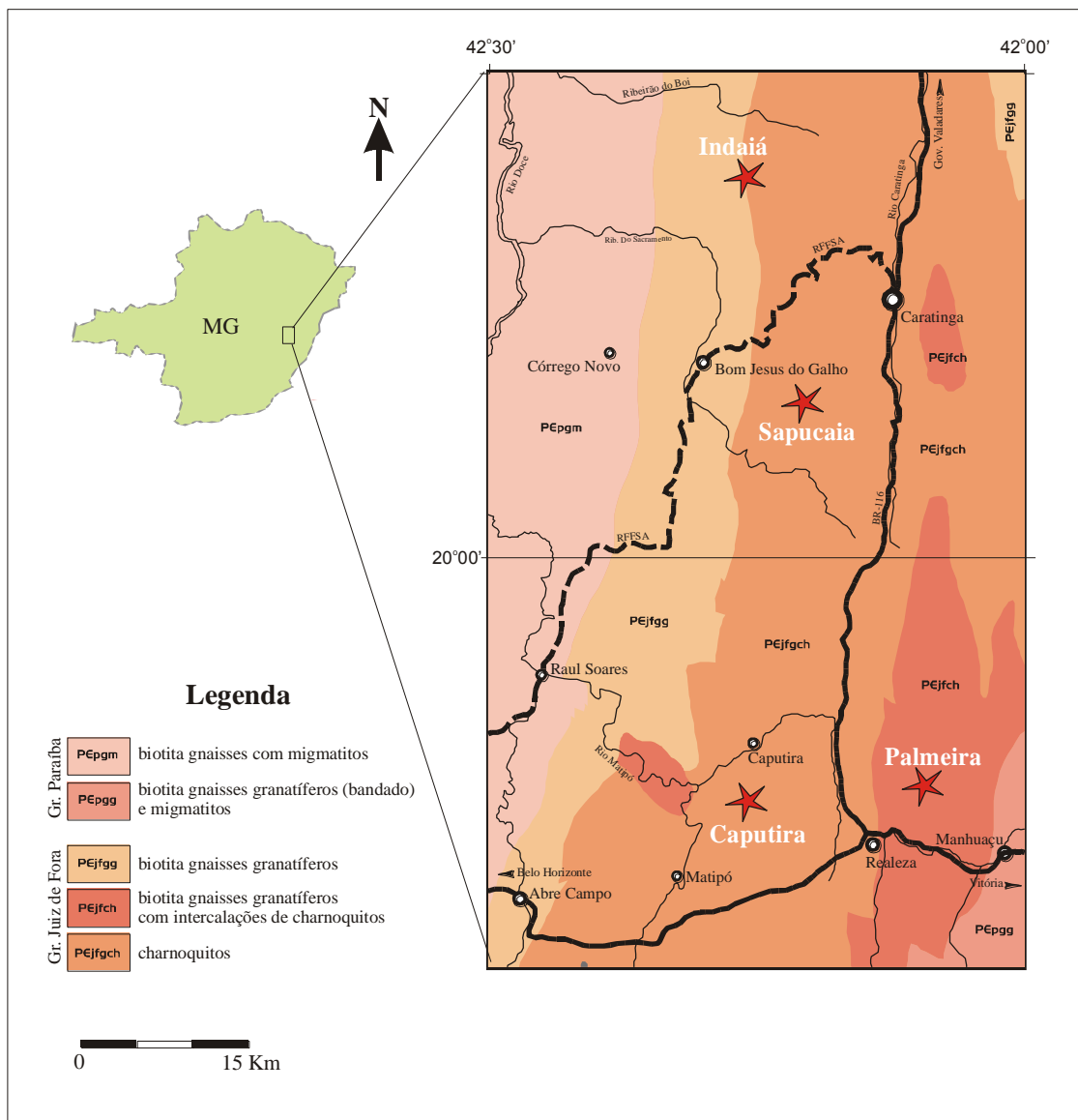


Figura 2.7 – Esboço geológico da região de Manhuaçu-Caratinga, mostrando a localização dos depósitos de coríndon (simplificado da Folha de Belo Horizonte, Projeto Radar Brasil, 1978).

A - 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+} (ver Quadro 2.4).

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 através 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 desse material ter sido originado em rochas ígneas ou pegmatitos presentes na região.

B - Sapucaia

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, sendo a 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 diafanidade, 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, ocorre ainda 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. Sendo o modo de ocorrência do coríndon em Sapucaia 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.

C - 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 e sendo 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 em Caputira 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 contendo 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.

D - 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 interessantes efeitos de asterismo, *chatoyance* ou efeito seda. Além disso alguns exemplares pequenos também mostraram o efeito alexandrita, semelhante a Indaiá e Sapucaia. O coríndon desse depósito também encontra-se em colúvio e aluviões e, tal como para os demais depósitos da região, a discussão sobre a sua gênese poderá basear-se nos estudos de seu registro geoquímico.

2.1.7.2 Região de Malacacheta-Novo Cruzeiro

O coríndon encontrado em Novo Cruzeiro, apesar de apresentar cor azul ou vermelho bem definidos, é de ocorrência muito restrita e, por isso, sem produção. Mais conhecida é a ocorrência do Córrego do Fogo, no município de Malacacheta, onde são extraídas safiras azul, incolor e bicolor de boa qualidade gemológica, associadas a alexandrita. Esse mineral-gema ocorre em cristais euédricos transparentes, no formato típico de barrilete e tamanho normalmente pequeno (<1cm). 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 a 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 2.1). 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 os 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.

2.1.7.3 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. Neste 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 se mostra 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 considerando-se os tratamentos existentes.

2.1.7.4 Outras Ocorrências

Dentro do estado de Minas Gerais são ainda conhecidas algumas outras ocorrências de coríndon 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, de 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.

Tabela 2.1 - Variação dos teores dos principais elementos além do Al_2O_3 nas amostras de coríndon das principais ocorrências de Minas Gerais (% em peso).

	<i>FeO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>Cr₂O₃</i>	<i>Ga₂O₃</i>
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	n.d	0,09 a 0,13	0,04 a 0,11
Sapucaia	0,26 a 0,80	n.d	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

2.1.8 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, tendo esse autor realizado 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 $1765^{\circ}C$ por 30 minutos. Os resultados obtidos estão na Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Tratamento térmico na safira de Indaiá (Themelis,1992).

<i>Observação sob luz fluorescente (// eixo c)</i>	
Antes do tratamento	Depois do tratamento
Azul	Violeta/azul
Azul claro/violeta	Azul médio
Violeta médio/azul	Violeta muito escuro/púrpura
Violeta/azul	Perda de cor; rosa/violeta

Themelis (1992) 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 estas 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 nestas gemas (Liccardo 1999), conforme tratamento térmico específico para este fim (aquecimento entre 1300°C e 1900°C em atmosfera oxidante por tempo variável de 1 a 14 dias – Hughes,1990).

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.



Fotografia 2.1 – Cristais de coríndon provenientes do estado da Bahia. O cristal maior (com 3,5 cm) e os cabochões esverdeados são de Catingal; abaixo, as amostras rosadas e os cabochões são de Lajedinho. Acima, o fragmento vermelho é proveniente de Uauá e à esquerda Paraguaçu (grãos) e Anagé (3 cabochões).

Fotografia 2.2 – Amostras lapidadas de safiras azuis e rosada provenientes de Indaiá (Minas Gerais). A gema com lapidação quadrada pesa 0,15 quilates.

Fotografia 2.3 - Rubis e safiras provenientes de Palmeiras (Manhuaçu - Minas Gerais). A gema facetada maior pesa 0,60 quilates.

Fotografia 2.4 - Safiras lapidadas provenientes de Malacacheta (Minas Gerais). A gema maior em lapidação *navette* pesa 1,5 quilates.



Fotografia 2.5 –Safiras lapidadas provenientes de Sapucaia (Caratinga - Minas Gerais). A gema maior pesa 0,30 quilate.

Fotografia 2.6 – Fragmentos e cabochões de safiras e rubi provenientes de Palmeiras (Minas Gerais). Alguns exemplares apresentam um interessante efeito-seda.

Fotografia 2.7 – Rubis e safiras provenientes de Palmeiras (Manhuaçu-MG). A gema facetada maior pesa 0,60 quilates.

Fotografia 2.8 - Cristais de coríndon provenientes do estado de Minas Gerais. O cristal maior (com 7 cm) é proveniente de Cláudio; à direita, Sapucaia, Indaiá e Palmeiras; no centro, Caputira e, embaixo, da esquerda para a direita, Campo Belo e Malacacheta



Fotografia 2.9 – Sistema de escoramento em garimpo aluvionar na região de Malacacheta (Minas Gerais).

Fotografia 2.10 – Garimpeiro de rubi e safiras na região de Palmeiras (Minas Gerais).

Fotografia 2.11 – Prospecção de coríndon aluvionar na região de Palmeiras (Minas Gerais)

Fotografia 2.12 – Garimpo aluvionar de safiras e alexandrita, na região de Malacacheta (Minas Gerais).

CAPÍTULO 3

OCORRÊNCIAS

3.1 KORUND IN BRASILIEN*

– Antonio Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista

3.1.1 Einleitung

Der Korund (Al_2O_3) mit seinen beiden Varietäten Rubin und Saphir ist nach dem Diamant das wichtigste gemmologische Mineral. Korunde von guter Qualität sind äusserst rar. HUGHES (1990) vertritt die Ansicht, dass im Unterschied zum Diamant und anderen Edelsteinen, Rubine und Saphire als charakteristisch asiatische Steine gelten können.

Modernere Technologien aber auch die zunehmende Akzeptanz von behandelten Edelsteinen ab etwa der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts, sowie die Entdeckungen von neuen Vorkommen in Asien, erhöhten den Wert und damit zugleich auch die Nachfrage nach Rubin und Saphir (THEMELIS, 1992). Angesichts dessen meint KANE (1999), der die Aussichten von Rubin und Saphir im neuen Jahrtausend diskutierte, dass der Markt nicht nur nach grösseren Mengen verlange, sondern auch minderwertigeren Korundqualitäten eine kommerzielle Chance gäbe. Weiterhin glaubt er, dass die Kombination von politischen und ökonomischen Faktoren in den Erzeugerländern im Zusammenhang mit neueren Explorations – und Gewinnungstechniken gesehen vielversprechende Resultate für den Korund bringen werde.

Eine deutliche Zunahme der Anzahl der Vorkommen in Brasilien (Abb. 3.1) und die Tatsache, dass viele granulitische Terrains, vergleichbar denen in Sri Lanka, welches ein grosser Rubin- und Saphirproduzent ist, bisher ungenügend studiert sind, werden dem Korund in Südamerika zukünftig eine wichtige Bedeutung bringen (LICCARDO & CHODUR, 2000). Ferner geben die neuen Technologien der Edelsteinsbehandlung vormals antiökonomisch geltenden Lagerstätten nun auch eine Chance.

Historisch gesehen blickt Brasilien betreffs seiner Korundvorkommen bereits auf Nachrichten bis in die 30er Jahre des vorigen Jahrhunderts zurück. Allerdings handelte es sich ausschliesslich um unbedeutende und unwirtschaftliche Vorkommen. In den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden blaue Saphire, in geringerem Masse auch gelbe, von guter gemmologischer Qualität am Rio

Coxim im damaligen Bundesstaat Mato Grosso, heute Mato Grosso do Sul, gefunden. Die wichtigste Lagerstätte der 90er Jahre war Indaiá in Minas Gerais, die während ca. drei Jahren eine konstante kommerzielle Produktion aufrecht erhielt. Sie ist aber seit 1996 geschlossen. Sporadisch werden die Alluvionen noch von dem ein oder anderen Garimpeiro (= Schürfer) auf Edelsteine durchsucht.

3.1.2 Derzeitige Situation

Unter den heutigen bekannten und untersuchten Vorkommen von Korund befinden sich wenigstens 28 verstreut über ganz Brasilien. Bei der Mehrzahl von ihnen handelt es sich um alluvionäre Vorkommen, die mit hochmetamorphen Gebieten oder mit alkalinen Komplexen verknüpft sind. Von den bekannten Vorkommen zeigen einige gute gemmologische Ausgangsvoraussetzungen, wobei diese Nummer noch gesteigert werden kann, denkt man an die Möglichkeiten thermischer Behandlung von Edelsteinen.

Im Bundesstaat Bahia kennt man schon einige Jahre die Vorkommen von Anagé und Capim Grosso, allerdings momentan noch mit wenig Aussicht auf grössere kommerzielle Nutzung. Derzeit machen die rezent entdeckten Vorkommen von Lajedinho, Catingal und Uauá von sich Reden, wenn auch ihre Qualität bisher nur die Herstellung von Edelsteinen im Cobochoenschliff erlaubt. Aber diese Vorkommen, verbunden mit den Neuinvestitionen der Regierung von Bahia auf dem Mineral- und Edelsteinsektor lassen gute Ergebnisse bezüglich der Produktion von Saphir und Rubin erwarten.

In Santa Catarina produziert die Mine von Barra Velha (CHODUR, 1997) mit Unterbrechungen Rubine und rosa Saphire von niedriger Transparenz, aber mit interessanten Effekten von Asterismus und Seide.

In Paraíba tauchen sporadisch immer mal wieder Vorkommen, die mit Pegmatiten verbunden sind, auf, z.B. Patos. Es handelt sich aber auch hier lediglich um kleinere Produktionen von blauem Saphir, ebenfalls mit niedriger Transparenz. In Tocantins und Rio de Janeiro werden in grösserer Anzahl blaue Korunde gefunden, die mit alkalinen Gesteinen relationiert sind. Allerdings sind es keine von Edelsteinmässiger Qualität.

Mit am besten steht momentan der Bundesstaat Minas Gerais da. In den Lagerstätten von Malacacheta und Indaiá werden interessante blaue Kristalle von guter Transparenz und belegter Edelsteinqualität gefördert (LICCARDO, 1999). Die Korunde der Lagerstätten Indaiá und Caputira, ebenfalls aus Minas Gerais, wurden geochemisch mit der Mikrosonde untersucht. Die Ergebnisse wurden

mit Proben aus Australien und Kambodscha verglichen (Abb. 3.2) und klassifizieren die brasilianischen Korunde aus diesen Vorkommen eindeutig als metamorphe Bildungen.

Die Korunde aus Caputira kommen sehr oft als idiomorphe Kristalle in der für sie typisch säulig-tonnenförmigen Tracht vor. Ausserdem zeigen sie fast immer stark rötliche Farben.

In den neuen Vorkommen von Palmeiras und Sapucaia (LICCARDO & JORDT-EVANGELISTA, 2001) treten sehr schöne wenn auch kleine Exemplare von Rubin und blauem und violetterem Saphir auf. Letzterer zeigt Alexandriteffekt, Asterismus und Seideffekt. Die für alle oben zitierten Vorkommen ähnlich geologische Bedingungen, lassen für diese Gegend weitere Funde erwarten. Ebenfalls aus Minas Gerais sind die Vorkommen von Campo Belo, Cláudio, Novo Cruzeiro, Conceição do Mato Dentro, Datas, Passos e Bom Jesus da Penha, bekannt.

3.1.3 Aussichten

In Brasilien werden bisher keinerlei thermische Behandlungen an Rubinen oder Saphiren vorgenommen. Die technischen Vorraussetzungen, wie eine kontrollierte Atmosphäre bei hohen Temperaturen, um gute Resultate zu erhalten, ist in kommerziellem Umfang noch nicht allgemein zugänglich. Eine solche Behandlung ist für diese Art von Steinen aber sehr wichtig, denn der grösste Teil des als minderwertig verworfenen Materials könnte derart behandelt signifikant in seinem Wert gesteigert werden. Als Folge der Einführung eines solchen Prozesses könnten viele Vorkommen ökonomisch interessant werden. Erste Untersuchungen an einer Reihe von Proben zeigen, dass grosse Teile des studierten Materials die entsprechende chemische Zusammensetzung und somit die Voraussetzungen für Farbänderungen bei thermischer Behandlung beinhalten.

Angesichts der Nachfrage nach Rubinen und Saphiren auf dem Weltmarkt und unter Berücksichtigung der Produktionsaussichten in den klassischen Lagerstätten wie Mogok, in Kashmir, bieten sich vielversprechende Perspektiven für die Förderung dieser Edelsteine auch in Brasilien. Das Anwachsen der Zahl neuer Vorkommen und neue Technologien in Behandlung und Verbesserung von Edelsteinen, bedeuten für den brasilianischen Markt eine grosse Zukunft.

Es ist sehr gut möglich, dass sich im Falle des Korund das Gleiche wiederholt, was mit Smaragd in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts geschah. Damals wurden vom Weltmarkt brasilianische Smaragde noch nicht akzeptiert. Dabei mag eine Rolle gespielt haben, dass man Smaragd zusehr mit Kolumbien in Verbindung brachte, aber auch protektionistische Massnahmen scheinen nicht ausgeschlossen. Später, nach einer gewissen Angewöhnungszeit regelte sich dann dieses traditionelle Marktverhalten. Heute sind brasilianische Smaragde qualitätsmässig weltweit anerkannt. Alles deutet also

darauf hin, dass Brasilien in den nächsten Jahren neben anderen Edelsteinen die Welt auch mit Rubin und Saphir bedienen wird

Tabelle 3.1: Geologische und gemmologische Eigenschaften von brasilianischen Korunden

Lokalität	Staat	Art der Vorkommen	Dominierende Farben	Gemmologische Qualität	Mögliche optische Effekte
Barra Velha	SC	Alluvium	Rot, Rosa, Schwarz	Niedrig	Silk und Asterismus
Lages	SC	Alkaline Gesteine	Braun	Keine	Keine
Coxim	MS	Alluvium	Blau, Gelb, Grün	Gut	Keine
Franca	SP	Alluvium	Rot	Keine	Keine
Peixe	TO	Pegmatite und alkaline Gesteine	Blau	Niedrig	Keine
Indaiá	MG	Alluvium	Blau, Purpur, Violet	Gut	Farbwechsel
Caputira	MG	Kolluvium	Rot	Niedrig	Seideffekt
Sapucaia	MG	Alluvium /Kolluvium	Blau, Purpur, Violet, Schwarz	Mittlere	Farbwechsel
Malacacheta	MG	Alluvium /Kolluvium	Blau, Farblos	Gut	Keine
Novo Cruzeiro	MG	Alluvium	Rot, Blau	Mittlere	Keine
Passos	MG	Metamorphe Gesteine	Grau	Keine	Keine
Campo Belo	MG	Kolluvium	Blau	Niedrig	Keine
Cláudio	MG	Alluvium /Kolluvium	Rötlich Braun	Niedrig	Keine
Cannaã	RJ	Pegmatite und Alkaline Gesteine	Blau, Grau	Keine	Keine
Nova Era	MG	Alluvium	Grau	Keine	Keine
Itaituba	PA	Alluvium	Grau	Keine	Keine
Jequitinhonha	MG	Alluvium	Grau	Keine	Keine
Lajedinho	BA	Metamorphe Gesteine	Rot, Rosa	Mittlere	Keine
Catingal	BA	Metamorphe Gesteine	Braun, Grün, Gelb	Niedrig	Keine
Paraguaçu	BA	Alluvium /Kolluvium	Braun	Keine	Keine
Anagé	BA	Alluvium	Braun	Niedrig	Keine
Serrinha	BA	Alluvium	Braun	Keine	Keine
Capim Grosso	BA	Alluvium	Braun	Keine	Keine
Uauá	BA	Metamorphe Gesteine	Rot ,Braun	Mittlere	Keine
Patos	PB	Pegmatite	Blau	Niedrig	Keine
Alluvium	PA	Alluvium	Rot	Gut	Keine
Palmeiras	MG	Alluvium /Kolluvium	Rot, Rosa, Purpur	Gut	Farbwechsel Asterismus / Seideffekt
Conceição do Mato Dentro	MG	Alluvium	Grün	Niedrig	Farbwechsel

* BA – Bahia; MG – Minas Gerais; MS – Mato Grosso do Sul; PA –Paraíba; RJ – Rio de

Janeiro; SC – Santa Catarina; SP – São Paulo; TO – Tocantins;

KORUND- VORKOMMEN IN BRASILIEN



Abb. 3.1. Korundvorkommen in Brasilien

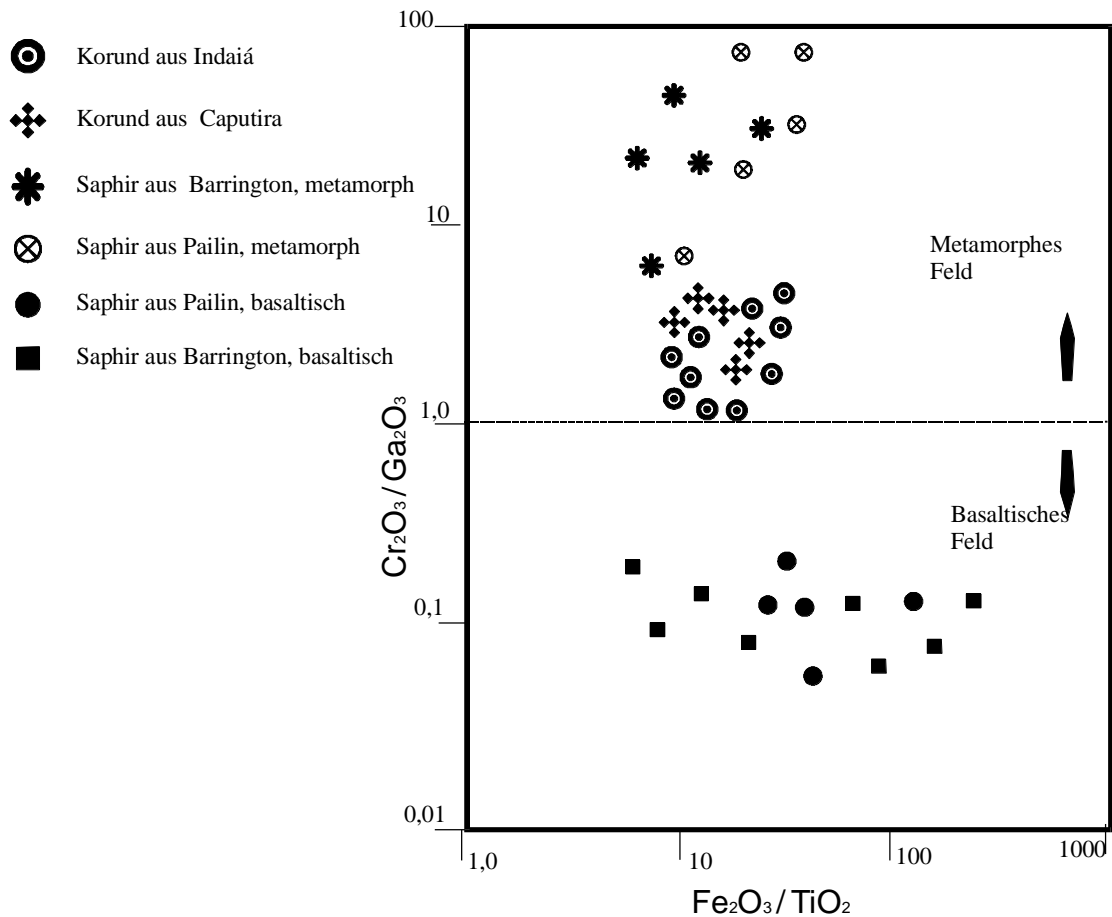


Abb. 3.2 Korunde aus Indaiá und Caputira dargestellt im $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ X $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ -diagramm. Die untersuchten Proben fallen in das von *Sutherland et al. (1998)* als metamorph definiertes Feld. Zum Vergleich sind aus der zitierten Arbeit die Analysen von metamorphen und basaltischen Korunden aus Barrington (Australien) und Pailin (Kambodscha) angegeben.



3.1



3.2



3.3



3.4

Foto 3.1. Korunde aus dem Vorkommen Barra Velha, Bundesstaat Santa Catarina. Bildbreite 3 cm.

Foto 3.2. Blauer Saphir aus Indaiá, Bundesstaat Minas Gerais, in einem Goldring.

Foto 3.3 - Korundschürfer im Vorkommen von Sapucaia, Bundesstaat Minas Gerais

Foto 3.4 - Korundschürfer im Vorkommen von Indaiá, Bundesstaat Minas Gerais

3.2 OCORRÊNCIAS DE CORÍNDON NA PORÇÃO LESTE DE MINAS GERAIS

Antonio Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista

3.2.1 Abstract

Deposits of corundum in the region of Manhuaçu – Caratinga, eastern Minas Gerais, are described in terms of geology, economic potential, mineralogy and chemistry. The alluvial and colluvial deposits of Indaiá, Sapucaia, Caputira and Palmeira are found in middle to high grade metamorphic terrain belonging to the Juiz de Fora and Mantiqueira complexes cut by pegmatites as well as mafic rocks.

Gemmological characterization in terms of mineral color and inclusions indicate a good economic potential as gemstone of the studied corundum. The identification of mineral inclusions and the study of the crystal chemistry led to the interpretation of a metamorphic origin for the corundum. The similar geology of the Manhuaçu-Caratinga area and the region where the important ruby and sapphire deposits from Sri Lanka are found suggests that new deposits might be discovered in the eastern region of Minas Gerais.

3.2.2 Resumo

Depósitos de coríndon na região de Manhuaçu – Caratinga, leste de Minas Gerais, são descritos em termos de geologia, potencial econômico, características mineralógicas e químicas. Os depósitos aluvionares e coluvionares de Indaiá, Sapucaia, Caputira e Palmeira estão encaixados em terrenos metamórficos de médio a alto grau pertencentes aos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira, entrecortados por pegmatitos e rochas máficas.

A caracterização gemológica em termos de cor e inclusões indica um bom potencial econômico do coríndon estudado como gema. A identificação das inclusões minerais e a química mineral indicam uma origem metamórfica para esse mineral. A similaridade da geologia da região de Manhuaçu – Caratinga e a dos importantes depósitos de rubi e safira do Sri Lanka sugere que a região leste de Minas Gerais apresenta potencial favorável para o surgimento de novas ocorrências.

3.2.3 Introdução

Novas ocorrências de coríndon com potencial gemológico na porção oriental do estado, na faixa entre Manhuaçu e Caratinga, surgiram recentemente no panorama mineral de Minas Gerais. Quatro ocorrências constituídas por depósitos secundários são conhecidas nas localidades de Indaiá, Sapucaia, Caputira e Palmeira (Figura 3.3). Trabalhos recentes em rubis e safiras de outros lugares do mundo,

também de depósitos secundários, mostram ser possível inferir a origem do mineral através de correlações químicas e do estudo de inclusões (Sutherland *et al.* 1998; Sutherland & Schwarz 2001). Similaridades dos condicionantes geológicos e de características mineralógicas e químicas sugerem um modelo genético em comum para as ocorrências da faixa Manhuaçu-Caratinga, apontando, portanto, para a existência de uma zona com potencial para o surgimento de novas ocorrências de coríndon em Minas Gerais.

3.2.4 Localização

As quatro ocorrências situam-se próximas do eixo Manhuaçu-Caratinga, a cerca de 250km a leste de Belo Horizonte (Figura 3.3). A ocorrência de Indaiá pertence ao município de Vargem Alegre, aproximadamente a 20km a noroeste de Caratinga, a montante do Córrego São Gabriel. No município de Sapucaia, a cerca de 25km a sudoeste de Caratinga, nas cabeceiras do córrego Ferrugem encontra-se a segunda ocorrência (Sapucaia). A ocorrência de Caputira (no município de mesmo nome), localiza-se no distrito de São Caetano, em direção a Matipó (cerca de 4km) e a de Palmeira situa-se no município de Manhuaçu, distrito de mesmo nome.

3.2.5 Geologia da Região

Nesta região ocorrem litologias pertencentes a terrenos metamórficos de médio até alto grau, como gnaisses, granulitos e charnoquitos. Essas litologias fazem parte da Província Mantiqueira, segundo a classificação estrutural de Almeida *et al.* (1977), que abrange as rochas pré-cambrianas da porção leste de Minas Gerais, sul da Bahia e norte do Espírito Santo, compondo a chamada faixa móvel transamazônica, reativada no Evento Brasileiro. A região tem sido alvo de diversos estudos e interpretações, tendo recebido variadas denominações locais e regionais como Série Barbacena (Barbosa, 1954), Paraíba do Sul (Fontes *et al.*, 1978) e Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora (Almeida *et al.*, 1984). Drumond (1985) enquadra as litologias dessa região nos Complexos Gnáissico-Migmatítico, Plutono-Vulcano Sedimentar Gnáissico e Charnoquítico.

Almeida *et al.* (1984) apontam que o limite entre os Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora é assinalado por zonas de falhas inversas com amplas faixas de cataclase e milonitização. Haralyi & Hasui (1982) destacam um forte alinhamento magnético e gravimétrico com aproximadamente 230km, que parece coincidir com o limite entre os gnaisses (a oeste) e os charnoquitos (a leste). Costa *et al.* (1998)

subdividem as unidades litológicas na região de Manhuaçu em gnaisses do Complexo Juiz de Fora, gnaisses granulíticos do Complexo Paraíba do Sul intercalados dentro de gnaisses bandados do Complexo Mantiqueira, ao longo do sistema transcorrente Abre Campo (*strike-slip shear zone*). Trabalhos recentes como de Cunningham *et al.* (1998) e Costa *et al.* (1998) situam as litologias a leste (Complexo Juiz de Fora) no Cinturão Móvel Costeiro (Ribeira) de idade neoproterozóica e a oeste (Complexo Mantiqueira) como sendo um bloco crustal de idade arqueana. Fischel *et al.* (1998), em datação isotópica (Sm-Nd) na região próxima a Manhuaçu, encontraram para rochas do Complexo Mantiqueira idades entre 2,53 e 3,26 Ga (arqueano a neoarqueano). Esses mesmos autores apontam para as rochas do Complexo Juiz de Fora uma idade de 2.22-2.13 Ga, na região de Abre Campo – Manhuaçu, situando esse conjunto no paleoproterozóico. As rochas desse cinturão sofreram remobilização e rejuvenescimento tanto no Transamazônico (2.1 – 1.8 Ga) como no Brasileiro (680 – 450 Ma).

As ocorrências de coríndon (Figura 3.3) encontram-se em terrenos gnáissicos-migmatíticos do Grupo Paraíba (equivalente ao Complexo Mantiqueira) e terrenos granulíticos e charnoquíticos do Grupo Juiz de Fora (equivalente ao Complexo Juiz de Fora), conforme designação no mapa do Projeto Radar Minas Gerais, Folha Belo Horizonte, escala 1:500.000. Além disso há inúmeros corpos pegmatíticos que entrecortam toda a região.

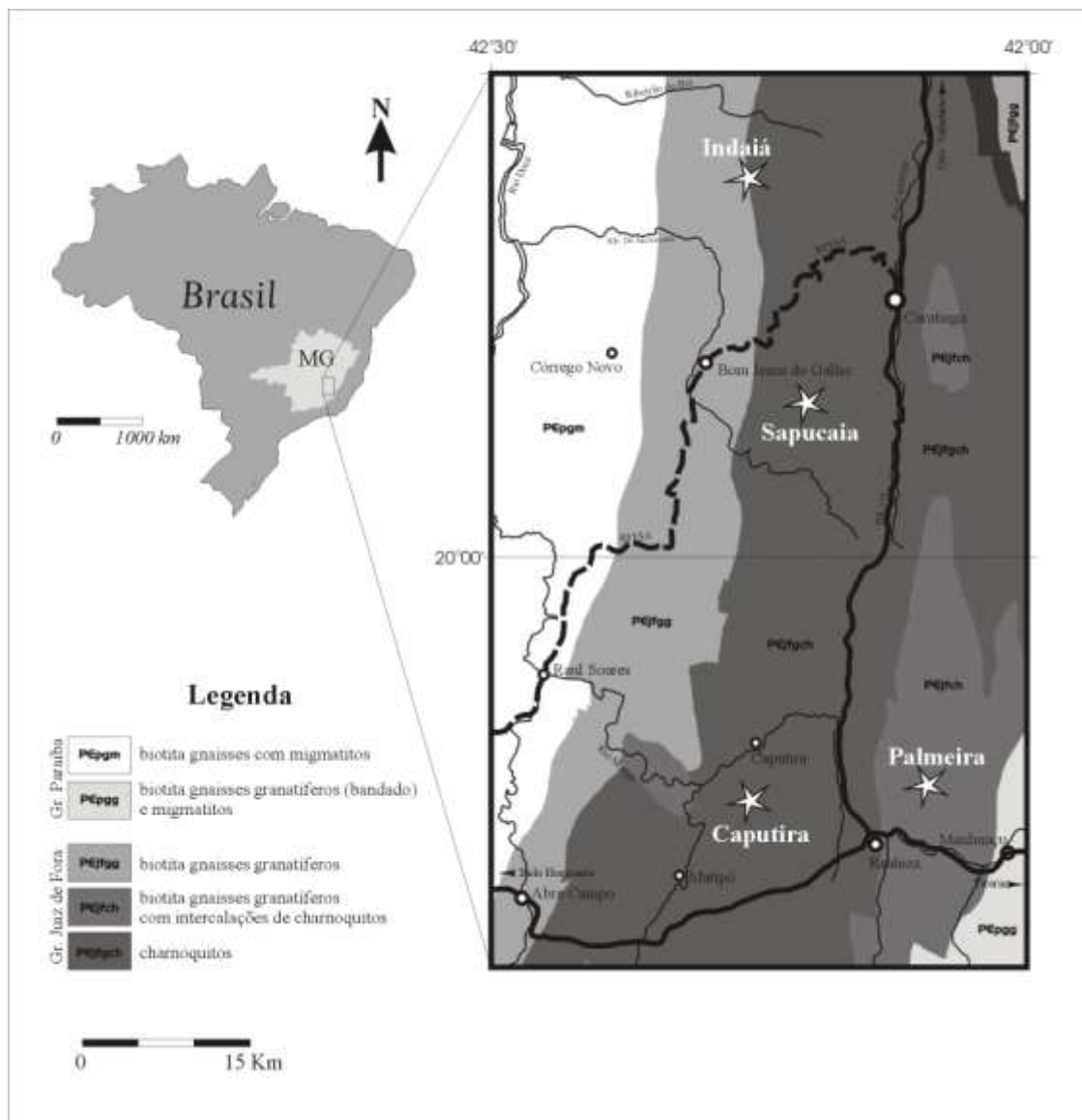


Figura 3.3- Esboço geológico da região de Manhuaçu/Caratinga, mostrando a localização dos depósitos de coríndon estudados. Simplificado do Projeto Radar Minas Gerais (1978) - Folha Belo Horizonte (esc. 1:500.000).

Figure 3.3: Geological map of the Manhuaçu/Caratinga region showing the localization of the studied corundum deposits. Modified after Projeto Radar Minas Gerais, 1978, Folha Belo Horizonte (1:500.000).

3.2.6 Análises Realizadas

As análises químicas do coríndon de uma parte das ocorrências foram realizadas no laboratório do IGc-UnB num equipamento CAMEBAX modelo SX50, com potencial de aceleração de 15kv e corrente do feixe de 25nA em WDS (análises quantitativas). Foram realizadas cerca de 70 análises pontuais em 10 amostras de Indaiá e 30 análises em 5 amostras de Caputira, para os elementos Al, Cr, Fe, Ti, Ga, Mn e V.

Para a análise e identificação das inclusões sólidas do coríndon, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro acoplado. O equipamento utilizado nestas análises foi um aparelho EDAX DXY PHILIPS XL-30, o qual encontra-se em operação no LAC-Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento, convênio COPEL/UFPR, em Curitiba.

Com o objetivo de constatar a presença de fases hidratadas da alumina tais como diásporo (β - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), bohemita (α - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), gibbsita (α - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e bayerita (β - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), o material foi submetido a análises térmica diferencial (ATD), termo-gravimétrica (ATG), espectroscopia no infravermelho e difratometria de raios X (Liccardo *et al.* 2000b).

Como análises complementares, utilizaram-se fluorescência de raios X (EDXRF), para detecção de alguns elementos-traços (realizadas no Instituto Gübelin, na Suíça) em 5 amostras de Indaiá, para os elementos Cr, Ga, Fe e Ti e análises gemológicas de rotina.

3.2.7 As Ocorrências

3.2.7.1 Indaiá

Nessa ocorrência, safiras de colorações que variam de azul profundo ao violeta, quase púrpura, são encontradas em depósitos coluvionares e aluvionares. O corte do colúvio revela um nível mais mineralizado em safira, de composição caulinítica e coloração esbranquiçada, que se destaca do restante do manto de intemperismo avermelhado. Na região são encontrados biotita gnaisses, enderbitos e granada granulitos, além de inúmeros corpos de pegmatito. Entre os minerais pesados encontrados no colúvio e nos aluviões, detectou-se a presença de sillimanita, ilmenita, rutilo, magnetita, granada e zircão. Algumas das rochas encaixantes apresentaram granada, espinélio e sillimanita/cianita, revelando altos teores de Al. Além disso, quartzo é escasso ou mesmo ausente em certas amostras, o que indica pobreza em Si, ambiente propício à formação de coríndon (Liccardo 1999).

Os cristais apresentam-se anédricos, geralmente de tamanho pequeno (< 4 mm) e alguns mostram um moderado efeito alexandrita (efeito de mudança de cor). 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 (Liccardo 1999).

Análises de microsonda eletrônica e de fluorescência de raios X (EDXRF) mostraram a presença de Fe, Ti e Cr, que são considerados como elementos causadores de cor na safira (Hughes 1990). O efeito alexandrita e a forte fluorescência são associados à presença do íon Cr^{3+} . Os teores determinados foram de 0,01 a 0,05% (em peso) para o TiO_2 , 0,01 a 0,09% para o Cr_2O_3 , 0,32 a 0,85% de Fe_2O_3 (todo o ferro calculado como Fe_2O_3) e 0,01 a 0,03% para o Ga_2O_3 (Liccardo *et al.* 1999).

Trabalhos recentes em coríndon da Austrália e do Camboja utilizam a relação $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ como parâmetro indicativo para uma gênese metamórfica ou basáltica desse mineral (Sutherland *et al.* 1998; Sutherland & Schwarz 2001). Schwartz & Stern (2000) aplicam esse estudo para rubis e safiras de várias outras localidades no mundo e mostram o grande potencial desse método na pesquisa genética do coríndon. A utilização do diagrama $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ versus $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ de Sutherland *et al.* (1998) mostra que o material de Indaiá situa-se no campo metamórfico (Figura 3.4).

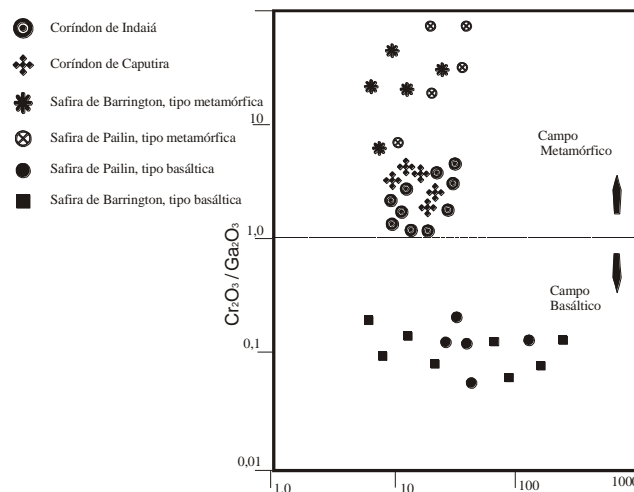


Figura 3.4 - Coríndon de Indaiá e Caputira plotados no diagrama $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ X $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$. Nota-se que as amostras estudadas situam-se no campo metamórfico delimitado por Sutherland *et al.* (1998). Para comparação, análises de coríndon metamórfico e basáltico de Barrington (Austrália) e Pailin (Camboja) também são mostradas (Sutherland *et al.* 1998).

Figure 3.4 - Corundum from Indaiá and Caputira plotted in the $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ X $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ diagram. Notice that the studied samples fall within the metamorphic field delimited by Sutherland *et al.* (1998). For comparison, analyses of metamorphic and basaltic corundum from Barrington (Australia) and Pailin (Cambodia) are shown (Sutherland *et al.*, 1998)

O estudo de inclusões sólidas utilizando o MEV com EDS, revelou a presença de um dos polimorfos de Al_2SiO_5 (cianita, sillimanita ou andaluzita) no coríndon (Figura 3.5). A presença de rochas encaixantes portadoras de cianita e sillimanita, indica que o coríndon se formou no mesmo evento metamórfico que as encaixantes.

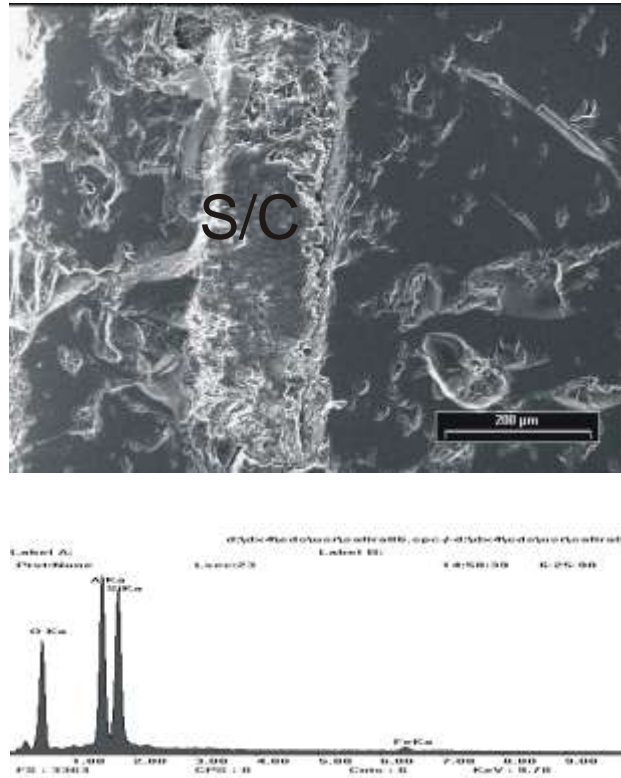


Figura 3.5 - Imagem em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) de inclusão (S/C) de polimorfo de Al_2SiO_5 (sillimanita ou cianita) em coríndon de Indaiá, com o respectivo gráfico (EDS) indicando os picos de Al, Si e O.

Figure 3.5: SEM-image of inclusion (labeled S/C) of an Al_2SiO_5 -polymorph (kyanite or sillimanite) in corundum from Indaiá. Below, EDS-spectrum of the inclusion, showing the Al, Si and O peaks.

3.2.7.2 Sapucaia

A safira de Sapucaia ocorre como cristais euédricos, subédricos e em fragmentos irregulares, nas cores azul, púrpura, violeta, verde e preta. Apresenta hábito característico, com prismas hexagonais alongados e muitas vezes terminados em bipirâmides, sendo a 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 diafanidade, são opacos até transparentes, sendo que uma parte pode ter aproveitamento gemológico, apesar de fortemente fraturados; 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, o efeito seda (brilho prateado sedoso) e, nas safiras pretas, ocorre ainda 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). As características ópticas principais são pleocroísmo moderado a forte (azul/azul escuro) e índice de refração de 1,759/1,762 e 1,768, com birrefringência máxima registrada de 0,009 (Liccardo *et al.* 2000a).

A descrição preliminar da safira encontrada em Sapucaia aponta boas possibilidades de aproveitamento gemológico para esse material, à semelhança da safira de Indaiá, principalmente em relação às cores azul e violeta e aos efeitos ópticos especiais apresentados. Possivelmente esse aproveitamento poderá ser melhorado se essas safiras forem tratadas termicamente e/ou seja utilizada uma lapidação adequada aos efeitos ópticos.

3.2.7.3 Caputira

Em Caputira o material é encontrado em colúvio de cor vermelho-arroxeadado, que contém seixos e matacões de quartzito sobreposto à provável rocha hospedeira do coríndon (Campos 1999). O mesmo autor cita ter sido encontrado um fragmento de rocha alterada contendo cristais de coríndon truncando uma foliação definida pela orientação da mica, sugerindo uma cristalização sin- a pós-tectônica em relação ao evento que gerou essa foliação e atribuindo, portanto, uma origem metamórfica para a rocha e o mineral.

O coríndon apresenta-se em quase sua totalidade em cristais excepcionalmente bem formados, com primas hexagonais, geralmente terminados em pinacóide, raramente com bipirâmides. A coloração varia de castanho a avermelhado com algumas tonalidades tendendo ao púrpura escuro e os cristais são em geral centimétricos (até 4 ou 5cm). Campos (1999) aponta que o hábito no formato de “barrilete”, típico desse mineral, é bastante incomum, não atingindo 1% das amostras estudadas. É comum, ainda, a presença de maclação polissintética segundo as faces romboédricas. Detectou-se diásporo através da difratometria de raios X, ATD, ATG e infravermelho (Liccardo *et al.* 2000b), o qual provavelmente está preenchendo os planos de geminação do coríndon, como descrito em outras ocorrências (Chodur 1997).

Campos (1999) menciona ainda que, nas análises químicas, esse coríndon revelou teores relativamente elevados de Fe_2O_3 (0,27 a 0,51% em peso – todo o Fe calculado como Fe_2O_3) e baixos de Cr_2O_3 (0,05 a 0,22% em peso). Quanto aos teores de TiO_2 , variam de 0,00 a 0,04(% em peso)(Campos 1999 e Liccardo *et al.* 1999) e os teores de Ga_2O_3 variam de 0,01 a 0,05% (Liccardo *et al.* 1999). Em diagrama $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ x $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ o coríndon de Caputira também cai no campo de origem metamórfica (Figura 3.4).

3.2.7.4 Palmeiras

Essa é uma ocorrência encontrada recentemente na região e por isso, a menos conhecida. Apresenta produção de material para o mercado de gemas. Os cristais de coríndon encontrados em Palmeira são euédricos, de coloração predominantemente avermelhada (rubi ou safira rosa), em menor escala também violeta ou púrpura, com hábitos prismático alongado e em “barrilete”, com tamanhos variando de 0,5 a 4cm. Análises preliminares com MEV (EDS) revelaram a presença de zircão, diásporo (confirmado em difratometria de raios X, ATD e ATG) e rutilo arredondado e acicular. A presença de rutilo em grande quantidade costuma causar interessantes efeitos de asterismo, *chatoyance* ou mesmo efeito seda. Além disso, alguns exemplares pequenos também mostraram o efeito alexandrita, semelhante aos de Indaiá e Sapucaia. O coríndon desse depósito também encontra-se em colúvio e aluviões e, tal como para os demais depósitos, a discussão sobre a sua gênese poderá basear-se nos estudos da sua assinatura geoquímica.

3.2.8 Resultados e Discussões

A caracterização mineralógica e química do coríndon dos depósitos da região de Manhauçu e Caratinga e a associação com dados de campo permite algumas inferências, tanto quanto ao potencial gemológico como quanto à gênese desse mineral.

A presença de fases hidratadas da alumina, especificamente o diásporo encontrado ao longo dos planos de geminação polissintética resulta normalmente em diminuição de transparência e, conseqüente, perda de aproveitamento gemológico. Esses minerais, quando associados ao coríndon ou como produto de sua alteração, normalmente são de difícil identificação por meios ópticos (Chodur 1997). O coríndon é estável em altas temperaturas (2000⁰C), não devendo portanto apresentar nenhuma perda de massa por aquecimento. Assim, qualquer reação observada nas análises termo diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) pode ser atribuída à presença de outras fases minerais associadas. As amostras estudadas apresentaram na ATD uma reação endotérmica entre 450 e 520⁰C e na ATG, uma perda de massa nesta mesma faixa de temperatura. Como pela difração de raios X observou-se a presença de diásporo, é pertinente associar esta perda de massa à liberação de água da fase hidratada (Liccardo *et al.* 2000b).

Existe uma relação entre a presença do diásporo e o grau de transparência do coríndon, conforme descrito por Chodur (1997) para o depósito de Barra Velha. Esse autor afirma que a presença de diásporo em planos de geminação é um provável fator de perda de transparência. A possibilidade da mudança de fase do diásporo com a perda da água por aquecimento, resultando na transformação em coríndon (Gitzen, 1970), sugere algumas perspectivas no sentido de melhoramento dos cristais quanto ao grau de transparência, desde que utilizados os procedimentos de tratamento térmico adequado.

A análise dos elementos-traços e elementos menores das amostras de coríndon de Indaiá e Caputira apontou uma gênese metamórfica para esse material. As características geológicas dos locais (terrenos metamórficos), as inclusões de polimorfos de Al₂SiO₅ (tipicamente metamórficos) no coríndon de Indaiá e as evidências de campo encontradas por Campos (1999) em Caputira são fortes elementos para indicar o metamorfismo como sendo o gerador desse mineral na região. É razoável, portanto, dadas as similaridades entre os quatro depósitos, supor uma gênese semelhante também para Sapucaia e Palmeira, evidenciando uma área de potencial muito grande para o surgimento de novas ocorrências.

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 desta região. Segundo estes autores, cinturões de granulitos metassedimentares produzidos por colisão de placas são ambientes

geológicos propícios para a formação de minerais-gemas. Dahanayake *et al.* (1980) concluíram que a fonte dos depósitos sedimentares de coríndon no Sri Lanka são gnaisses granatíferos e escarnitos.

A propósito destes estudos nos terrenos granulíticos do Sri Lanka, é interessante a observação de Munasinghe & Dissanayake (1981) que traçam um comparativo entre estas litologias e os cinturões granulíticos metassedimentares do Brasil, descritos por Wernick & Almeida (1979), evidenciando similaridades na história geológica e no potencial para geração de coríndon. Os dados ora apresentados apontam para uma confirmação desse potencial, não só na região de Manhauçu-Caratinga, como também em outros terrenos granulíticos do Brasil (Liccardo & Chodur, 1999).

3.3 CORÍNDON EM TERRENOS GRANULÍTICOS NOS ESTADOS DE SANTA CATARINA (BARRA VELHA) E MINAS GERAIS (INDAIÁ), BRASIL*

Nelson Luiz Chodur & Antonio Liccardo

3.3.1 Resumo

Cristais de rubi e safira são encontrados em depósitos colúvio–aluvionares associados a terrenos granulíticos, nos estados de Santa Catarina (Barra Velha) e Minas Gerais (Indaiá). Foram realizados estudos de inclusões, análises dos elementos Cr, Fe, Ti, e Ga, além do comportamento espectroscópico do coríndon destas localidades. Em Barra Velha (SC), a coloração dos cristais é predominantemente vermelha (rubi) e os teores encontrados para os elementos menores foram: Cr de 0,03 a 0,83%, Fe de 0,12 a 1,51%, Ti de 0,00 a 0,43% e Ga de 0,01 a 0,02%. A presença de clorita, biotita, rutilo, zircão e monazita como inclusões sólidas e os dados microtermométricos obtidos nas inclusões fluidas são compatíveis com as condições de metamorfismo regional das rochas encaixantes. Em Indaiá (MG) são encontradas safiras azuis a violeta, cujas análises químicas revelaram teores de Cr entre 0,03 e 0,09%, Fe entre 0,38 e 0,85%, Ti entre 0,02 e 0,05% e Ga entre 0,01 e 0,03%. Entre as inclusões sólidas constatou-se a presença de espinélio, sillimanita e/ou cianita, monazita, e ilmenita. Trabalhos recentes, em rubis e safiras da Austrália (Barrington) e Camboja (Pailin), consideram as relações entre os teores dos elementos citados e o comportamento espectroscópico no ultravioleta-visível-infravermelho próximo como importantes indicativos na distinção de gênese (ígnea ou metamórfica) para este mineral. Para os casos de Barra Velha e Indaiá, os dados de elementos traços, espectroscopia e inclusões, indicam que a origem do coríndon está relacionada às rochas granulíticas regionais.

3.3.2 Abstract

Ruby and sapphire crystals have been found in alluvial colluvium deposits associated with granulitic rocks, both in the states of Santa Catarina (Barra Velha) and Minas Gerais (Indaiá) (Fig. 3.6), which have been submitted to inclusion studies, Cr, Fe, Ti and Ga determination, as well as corundum spectroscopic behaviour. In the Barra Velha (SC) deposits the crystals color is primarily red (ruby variety) and display the following minor and trace elements contents: Cr 0.03 to 0.83%; Fe 0.12 to 1.51%; Ti 0.00 to 0.43% and Ga 0.01 to 0.02%. The presence of chlorite, biotite, rutile, zircon and monazite as solid inclusions added to the microthermometric data obtained from the fluid inclusions are compatible to the regional metamorphic conditions of the host rocks. Chemical analysis from the blue- and violet-colored sapphire

found in Indaiá (MG) revealed Cr composition varying from 0.03 to 0.09%; Fe from 0.38% to 0.85%; Ti from 0.02 to 0.05% and Ga from 0.01 to 0.03%. Spinel, monazite, ilmenite, sillimanite and/or kyanite were found as solid inclusions. Recent studies undertaken on ruby and sapphire from Australia (Barrington) and Cambodia (Pailin) take into consideration the relation between the content of the elements above and the spectroscopic behaviour in the ultraviolet-visible-near infrared as important evidence to establish the igneous or metamorphic genesis of this mineral. Trace elements data (Fig 3.7), spectroscopic determination (Fig. 3.8) and inclusion analysis, suggest that the origin of both the Barra Velha and Indaiá corundum is related to the underlying granulitic rocks.

3.3.3 Introdução

Recentemente, no Brasil, foram registradas duas ocorrências de coríndon em depósitos secundários. A primeira está localizada na região nordeste do estado de Santa Catarina, a cerca de 15km a noroeste da cidade de Barra Velha, a aproximadamente 130km de Florianópolis e a outra localiza-se próximo à localidade de Indaiá, região centro-oeste do estado de Minas Gerais, a 250km de Belo Horizonte.

A caracterização do coríndon de Barra Velha quanto aos aspectos mineralógicos e geológicos foi apresentada por Chodur (1997), enquanto Liccardo (1999) estudou os aspectos genéticos dos depósitos de safira azul de Indaiá. Estes trabalhos revelam similaridades entre as duas ocorrências, que podem apontar para uma origem a partir dos terrenos granulíticos dessas regiões. Dados relativos à composição química, às inclusões sólidas e fluidas, além do comportamento espectroscópico do coríndon de ambas as ocorrências, serviram de suporte para este estudo comparativo à medida que essas informações puderam ser associadas com o contexto regional.

3.3.4 Metodologia Utilizada

Para a análise e identificação das inclusões sólidas do coríndon, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro acoplado. Trata-se de uma metodologia analítica de considerável importância em estudos mineralógicos, tendo em vista que permite a obtenção de imagens da superfície do material analisado sob grandes aumentos, além de fornecer a composição química semi-quantitativa desse material. O equipamento utilizado nestas análises foi um aparelho EDAX DXY PHILIPS XL-30, o qual encontra-se em operação no LAC-Laboratório Central de Pesquisa e

Desenvolvimento em Curitiba. Em amostras do coríndon de Barra Velha, foram realizadas também análises de inclusões fluidas, neste caso as medidas de microtermometria foram obtidas numa platina CHAIXMECA, modelo MTM 85, instalada no Laboratório de Inclusões Fluidas do Departamento de Mineralogia e Petrologia do IGc-USP, bem como em equipamento semelhante existente no Departamento de Geologia da UFPR.

A composição química do coríndon de Barra Velha foi obtida por microsonda eletrônica em um equipamento JEOL modelo JXA-8600 SuperProbe, com potencial de aceleração de 15kv, corrente do feixe de 20,10nA, que se encontra em operação no Laboratório de Microsonda e Microscopia Eletrônica de Varredura do IGc-USP. As análises químicas da safira de Indaiá foram realizadas no laboratório do IGc-UnB num equipamento CAMEBAX modelo SX50, com potencial de aceleração de 15kv e corrente do feixe de 25nA. Todas as análises, foram executadas em WDS (análises quantitativas), com um programa específico. Análises químicas complementares à microsonda eletrônica foram realizadas por fluorescência de raios X (EDXRF), em amostras de ambas as ocorrências, no Gübelin Gemmological Laboratory na Suíça, utilizando-se um programa especialmente preparado para análises de coríndon; neste caso foram determinados alguns elementos traços e menores como o cromo, o ferro, o titânio e o gálio.

Para a verificação do comportamento espectroscópico do coríndon de Barra Velha e Indaiá, além de detectar a presença dos principais elementos de transição tais como ferro, cromo e titânio, foram realizadas análises espectroscópicas na faixa de 300 a 800nm. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro PYE-UNICAM SP8-100 UV-VIS, disponível nos laboratórios do Gübelin Gemmological Laboratory (Lucerne, Suíça).

3.3.5 Contexto Geológico

Na região de Barra Velha, a geologia regional é representada por gnaisses anfíbolíticos e granulíticos de alto grau metamórfico, de idades eoproterozóicas, constituindo parte do Complexo Granulítico de Santa Catarina (Hartmann et al., 1979) ou Domínio Tectônico Luís Alves (Siga Jr., 1995), conforme está representado na Figura 3.6. Esta unidade mostra uma diversidade de litotipos, onde o principal é representado por gnaisses tonalíticos, ocorrendo ainda ultramafitos, piroxenitos, sienitos granulíticos, gnaisses calciossilicatados, quartzitos e formações ferríferas bandadas. A região apresenta ainda vastas áreas ocupadas por baixios topográficos, constituindo os colúvio-aluviões, onde são encontrados os cristais de coríndon.

Em Indaiá, as ocorrências de safira encontram-se em terrenos metamórficos de alto grau (Figura 3.6) que fazem parte da Província da Mantiqueira, segundo a classificação estrutural de Almeida et al. (1977). Esta unidade abrange as rochas pré-cambrianas da porção leste de Minas Gerais, sul da Bahia e norte do Espírito Santo, compondo a chamada faixa móvel transamazônica, reativada no evento brasileiro. São gnaisses bandados localmente migmatíticos, biotita-granada gnaisses, gnaisses cataclásticos, filonitos e milonitos. Ainda no contexto regional, a área encontra-se próxima ao contato com o Complexo Juiz de Fora, representado por rochas charnoquíticas de granulação fina a média, biotita-granada gnaisses, biotita-hornblenda-granada gnaisses, granulitos, mármore, rochas calciossilicáticas e quartzitos (Drumond, 1985). Em toda a região ocorrem corpos pegmatíticos pouco diferenciados, recentemente cadastrados pela CPRM, definindo o Campo Pegmatítico de Vargem Alegre.

3.2.6 Os Depósitos

Em Barra Velha cristais de rubi e safira são encontrados em depósitos sedimentares recentes, os quais ocupam vastas planícies aluvionares, principalmente na bacia de drenagem do rio Itapocu e porção norte da bacia do rio Itajaí Açu. Os depósitos são constituídos por quartzo leitoso (90%) e minerais pesados como magnetita, ilmenita, hematita, epidoto, rutilo e zircão entre os principais. São depósitos descontínuos e com ampla distribuição geográfica, porém com pequena espessura (~1,00m), variando conforme a topografia do substrato em que estão localizados (Chodur et al., 1993). Estes depósitos têm sua origem principalmente a partir das rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina e constituem-se basicamente de rampas coluviais, aluviões, coluviões e terraços aluviais. Os componentes líticos e minerais constituintes dos cascalhos não apresentam arredondamento, sugerindo uma deposição rápida, seja por fluxos gravitacionais ou por enxurradas, atestando um transporte a curta distância.

Em Indaiá, encontraram-se safiras azuis em aluviões no córrego Pedrosa e num depósito coluvionar na cabeceira do córrego Macuco, ambos afluentes do ribeirão do Boi que deságua no rio Doce. Os primeiros garimpos desta região foram iniciados nos aluviões, onde a safira era encontrada em níveis caulíníticos depositados em barrancos, à margem dos rios. Os minerais encontrados associados a esses níveis são quartzo, feldspato, moscovita, granada, e secundariamente ametista e berilo. No colúvio, onde a produção foi mais abundante, a safira se concentra em níveis de coloração esbranquiçada e composição caulínica. Esses níveis contrastam-se com o solo avermelhado de toda a região, típico do intemperismo de rochas gnáissicas. As safiras, assim como todo o cascalho acompanhante, não apresentam sinais de rolamento ou transporte. Uma análise dos minerais pesados encontrados tanto no colúvio quanto nos aluviões, revelou a presença de granada, sillimanita, monazita, ilmenita, zircão, magnetita e rutilo.

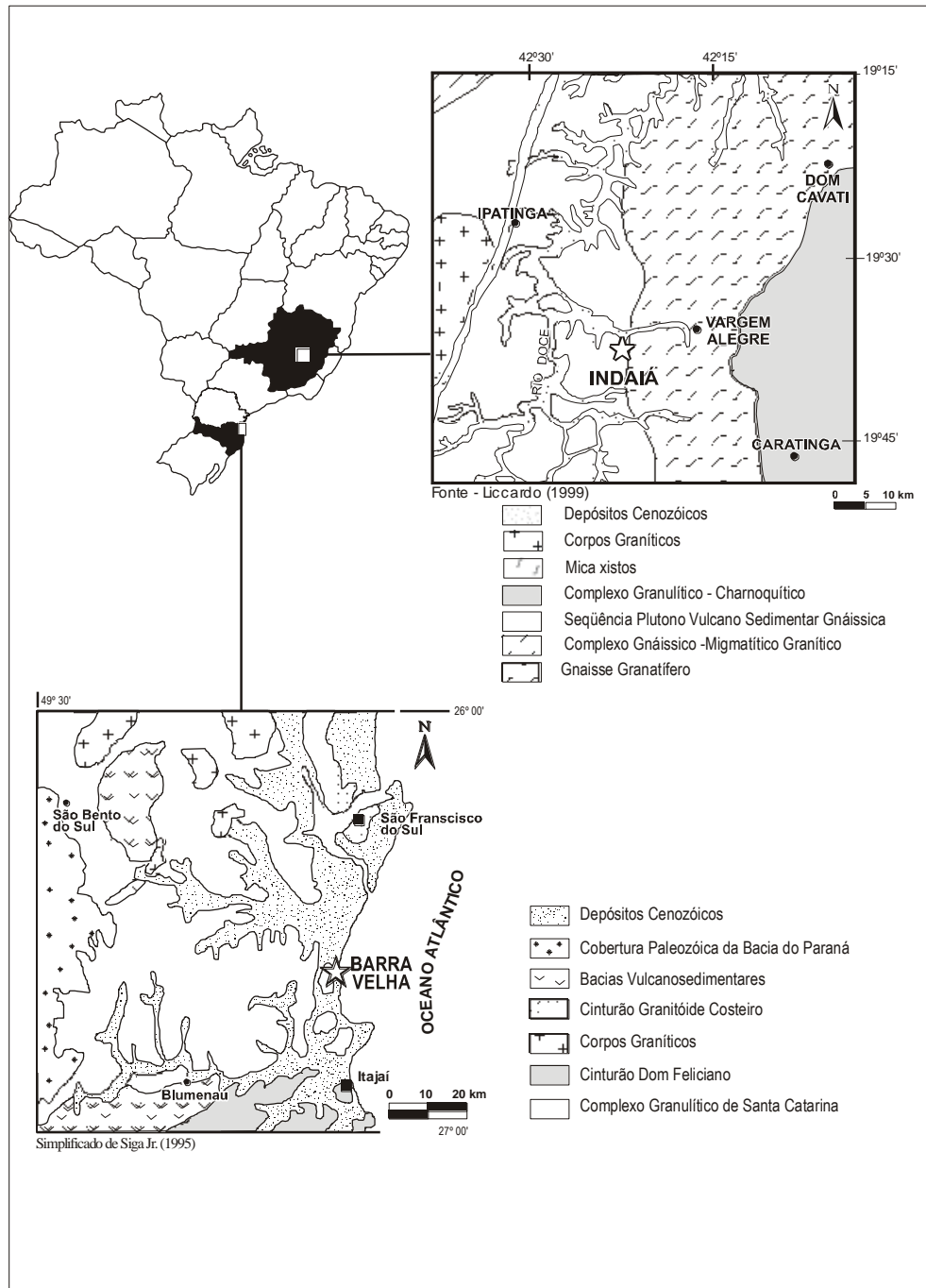


Figura 3.6 – Mapa geológico e de situação. *Localization and geological map of the studied areas.*

3.3.7 – Características do coríndon *RÍSTICAS DO CORÍNDON*

O coríndon de Barra Velha ocorre sob a forma de cristais cujas dimensões situam-se no intervalo de alguns milímetros a 10cm. Contudo análises granulométricas mostraram que a maior parte dos indivíduos (90%) possui dimensões entre 1,5 a 10mm. Com relação à cor, a grande maioria dos cristais exibe tonalidades variando entre o vermelho (rubi) e o rosa (safira rosa). Além disso ocorrem subordinadamente cristais de coríndon nas cores branca, cinza e preta correspondendo a variedades de safira. De um modo geral, os cristais são opacos, sendo pouco freqüentes os indivíduos com algum grau de transparência. Outra característica macroscópica é o aspecto rugoso superficial, bem como a presença de cavidades, fraturas, intercrescimentos e outros defeitos cristalinos. Quanto ao hábito, metade dos cristais possui formas irregulares, sendo os demais bipiramidados (30%) com o hábito em barrilete típico do coríndon (Hughes, 1990) ou prismáticos (20%). Observados ao microscópio, os cristais exibem uma grande quantidade de feições internas, tais como zonamentos hexagonais concêntricos, geminação polissintética, além de inclusões sólidas e fluidas. Outro aspecto característico desses cristais é a alteração para diásporo ao longo dos planos de geminação do coríndon. A presença desta fase hidratada de alumina induz a partição do cristal ao longo dos planos de geminação.

As safiras de Indaiá são predominantemente pequenas, com tamanho médio de 4mm (cristais maiores não ultrapassam 2cm de eixo maior) e apresentam-se, via de regra, com hábito anédrico, esporadicamente subédrico. Sua coloração varia de azul médio a escuro com tonalidades púrpura e violeta secundariamente. Morfologicamente os cristais apresentam aspecto quebradiço devido aos planos de partição associados a uma geminação polissintética. Esse coríndon apresentou densidade mais elevada do que a média (3,99 a 4,07) o que pode ser atribuído à grande quantidade de inclusões de minerais pesados encontrada. Alguns autores como Epstein *et al.* (1994) atribuem um aproveitamento gemológico em torno de 2% do total do material retirado destes depósitos.

3.3.8 Inclusões

A análise das inclusões de um mineral constitui, talvez, a maior fonte de informações a respeito de sua gênese. Muitas vezes as inclusões refletem indícios do ambiente geoquímico de formação do hospedeiro, além de dados de temperatura e pressão do ambiente gerador.

As inclusões sólidas encontradas no coríndon de Barra Velha foram: biotita, clorita, zircão, rutilo, monazita, pirita, óxidos secundários e pequenos cristais do próprio coríndon. Observou-se que a biotita possui coloração acastanhada e a clorita exibe a cor verde, ambas encontram-se como

fragmentos de hábito laminar e contornos irregulares. É importante salientar ainda que as inclusões de zircão e monazita ocorrem como cristais euédricos mostrando um certo arredondamento.

Em relação ao coríndon de Indaiá, as seguintes inclusões sólidas foram detectadas: rutilo, zircão, ilmenita, monazita, espinélio, moscovita, biotita e sillimanita/cianita. Neste caso, o zircão e a monazita também ocorrem arredondados, o rutilo aparece tanto em cristais isolados quanto em agulhas, a biotita possui coloração acastanhada, a moscovita ocorre como inclusão e sob a forma de agregados aos cristais.

No coríndon de Barra Velha os estudos ópticos e microtermométricos revelaram a presença de inclusões fluidas primárias, secundárias e pseudo-secundárias, com fases sólidas associadas. As análises forneceram a composição dos fluidos aprisionados, ou seja, foram encontradas inclusões fluidas essencialmente carbônicas com temperaturas de fusão do CO₂ em torno de -56,60C. As temperaturas de homogeneização do CO₂, obtidas via microtermometria nas inclusões encontradas, acusaram variações de -250C a +250C, sendo que os valores situados entre -200C a -250C são indicativos dos fluidos originais (Chodur et al., 1997).

3.3.9 Composição Química

O coríndon quando puro apresenta-se incolor e transparente, fato verificado também em cristais sintéticos formados a partir de alumina pura. Na natureza, apenas em raríssimos casos são encontradas safiras incolores, pois, nos ambientes de formação, é comum a presença de outros elementos que podem conferir várias colorações ao cristal. Estes elementos podem estar presentes no coríndon, tanto na forma de impurezas, como de cromóforos, podendo ser citados, entre esses últimos, o Cr⁺³ que produz a cor vermelha do rubi, e o Fe⁺³ e o Ti⁺³ que são responsáveis pela cor azul da safira (Hughes, 1990).

Os resultados das análises químicas mostram que o coríndon de Barra Velha é composto basicamente por 94,62% a 98,56% de Al₂O₃, variação esta em função dos outros elementos menores associados em diversas proporções, e de um certo conteúdo em água. Entre os elementos menores, foram constatados principalmente o cromo e o ferro, os quais aparentemente exercem muita influência na cor dos exemplares. Os demais elementos detectados parecem não ter qualquer relação com as propriedades do coríndon, estando presentes apenas como impurezas naturais. O coríndon dessa localidade possui concentrações de cromo com teores de 0,03% a 0,83%, de ferro de 0,12% a 1,51% e de titânio de 0,00% a 0,43%.

Para o coríndon de Indaiá, além do Al_2O_3 , foram registrados os teores dos elementos menores, os quais apresentaram a seguinte variação: FeO (ferro total) de 0,38% a 0,85%; TiO_2 de 0,02 a 0,05%; Cr_2O_3 de 0,03% a 0,09% e Ga_2O_3 de 0,01 a 0,03%.

Os elementos considerados cromóforos em potencial do coríndon tais como Ti, Cr e Fe, além do Ga, foram determinados também por fluorescência de raios X, análises estas que confirmaram os dados obtidos por microsonda eletrônica.

Comparativamente, as análises químicas para os elementos menores e traços, realizadas em amostras de coríndon de Barra Velha e de Indaiá, revelaram os seguintes teores (% em peso):

	Barra Velha	Indaiá
Cr_2O_3	0,03 – 0,83	0,03 – 0,09
FeO	0,12 – 1,51	0,38 – 0,85
TiO_2	0,00 – 0,43	0,02 – 0,05
Ga_2O_3	0,01 – 0,02	0,01 – 0,03

Sutherland *et al.* (1998), em estudo comparativo de exemplares de coríndon de Barrington (Austrália) e West Pailin (Camboja), utilizaram as relações Cr/Ga e Fe/Ti como parâmetro indicativo de possível origem da gema nos termos metamórfico ou ígneo (basalto). Para esses autores, gemas de origem ígnea têm uma relação $\text{Cr}_2\text{O}_3 / \text{Ga}_2\text{O}_3$ baixa (<1) e para gemas de origem metamórfica a relação é alta (maior ou em torno de 1).

A Figura 3.7 mostra o diagrama de variação química dos elementos-traço de coríndon derivado de terrenos metamórficos e basálticos da Austrália e Camboja, juntamente com os resultados obtidos para as amostras do coríndon de Barra Velha e Indaiá.

3.3.10 Espectroscopia

No espectro da faixa do ultravioleta – visível – infravermelho as principais áreas de absorção do rubi estão localizadas na região do violeta e do azul ao redor de 400 a 450nm, além de uma banda larga e centrada a 550nm.

As análises referentes à absorção realizadas em amostras do coríndon de Barra Velha, indicam bandas de absorção em 320 e 370nm (região do violeta) que são características do Fe^{+3} . O restante do espectro mostra bandas do cromo em 560nm, e uma muito pequena a 693nm, não sendo detectadas absorções devidas a outros elementos, tais como titânio ou ferro férrico. O espectro mostra ainda uma inflexão negativa a partir de 600nm.

Amostras de safira de Indaiá submetidas a estas análises mostraram a presença de algumas bandas que, conforme indicam estudos em safiras de outras localidades, são características para esta variedade mineral. Nesse espectro verifica-se uma banda de absorção pronunciada entre 370 e 380nm, que em safiras azuis do Sri Lanka, Mianmar, Vietnam e outras (Smith *et al.*, 1995), é associada à presença de Fe^{3+} . A anomalia gráfica registrada entre 500 e 600nm revela uma forte absorção na região do verde e pode estar vinculada à transferência de cargas $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Ti}^{4+}$, possível causa de cor azul nesta gema (Smith *et al.* 1995), sendo que esta mesma banda pode também ser atribuída ao íon Cr^{3+} .

Smith *et al.* (1995), num estudo comparativo da safira do Vietnam do Sul com safiras de outras localidades, citam como característico de safira de origem basáltica um *trend* de aumento de absorção a partir de 650nm (zona do vermelho e infravermelho), e que em geral é associado à transferência de carga $\text{Fe}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{3+}$. Sutherland *et al.* (1998) corroboram esta idéia, acrescentando que as safiras de Madagascar (origem tipo escarnito) são uma exceção, mas que em geral este *trend* tipifica safira de basalto. O espectro da safira de Indaiá, no entanto, mostra um *trend* oposto a este apontando para uma origem “não-basáltica”. A Figura 3.8 mostra o comportamento do coríndon de algumas localidades no mundo em relação aos resultados obtidos para amostras de Barra Velha e de Indaiá.

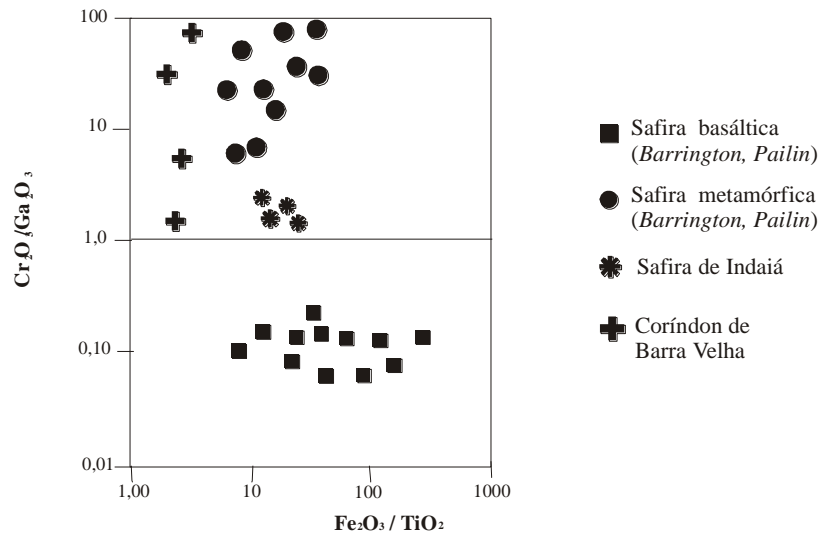


Figura 3.7 Diagrama de variação química dos elementos-traço de coríndon de Barra Velha e Indaiá, Barrington e Pailin (Sutherland et al., 1998).

Figure 3.7 Chemical variation diagrams of trace-elements of corundum from Barra Velha and Indaiá, Barrington and Pailin (Sutherland et al., 1998).

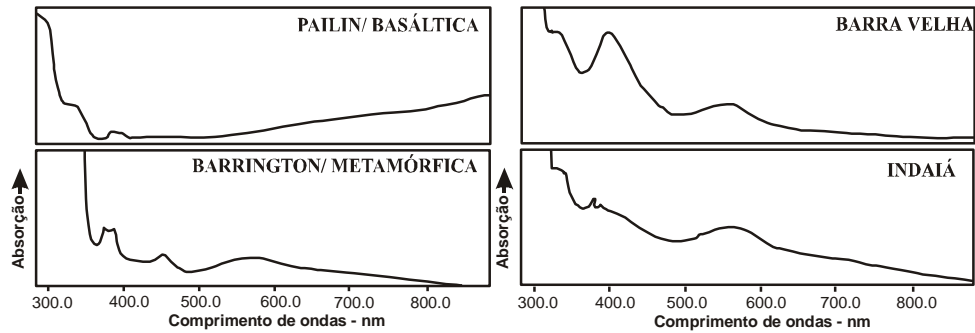


Figura 3.8 Espectros de absorção (UV-VIS-IV) de coríndon de Pailin, Barrington (Sutherland et al., 1998), Barra Velha e Indaiá.

Figure 3.8 Absorption spectra (UV-VIS-IV) of corundum from Pailin, Barrington (Sutherland et al., 1998), Barra Velha and Indaiá.

3.3.11 Discussões e Considerações Finais

Na maior parte das ocorrências mundiais, o coríndon está sempre associado a depósitos sedimentares recentes, e em muitos casos, a rocha de origem não foi ainda identificada, fazendo com que os pesquisadores associem os aspectos genéticos através das evidências reveladas pelas associações de campo e pelas características do próprio coríndon.

Embora os cristais de coríndon encontrados em Barra Velha e em Indaiá não tenham sido ainda detectados na sua rocha matriz, as evidências de campo e os dados de laboratório obtidos permitem estabelecer uma série de considerações a respeito da sua gênese.

Tanto o coríndon de Barra Velha quanto o de Indaiá contêm uma série de inclusões minerais, sendo algumas comuns às duas ocorrências, como biotita, zircão, rutilo e monazita. Em Barra Velha foram encontrados, ainda, clorita, pirita e coríndon e em Indaiá moscovita, sillimanita e espinélio.

A biotita identificada no coríndon de Barra Velha situa-se entre o campo da annita e da flogopita, tratando-se de uma mica de coloração castanha característica do fácies granulito. A clorita é característica de sedimentos pelíticos ricos em alumínio e magnésio; nesse caso, os cristais de clorita aparecem como relíctos preservados no interior do coríndon. Os cristais de zircão e de monazita, aparentemente arredondados, sugerem uma derivação a partir de sedimentos preexistentes associados aos pelitos. A presença destas inclusões no coríndon, nas encaixantes e nos concentrados do colúvio e aluviões é o indício de uma associação genética do coríndon, de ambas as localidades estudadas, com as rochas granulíticas ali presentes.

As análises microtermométricas realizadas em amostras do coríndon de Barra Velha forneceram a composição dos fluidos aprisionados como sendo essencialmente carbônica, refletindo desse modo, ambiente anidro típico da fácies granulito. Maesschalck & Oen (1989) encontraram para o coríndon do Sri Lanka, resultados semelhantes a esses de Barra Velha, onde as isócoras resultantes também indicaram que o coríndon daquela região formou-se sob condições da fácies granulito.

As relações Cr/Ga e Fe/Ti, conforme utilizadas em trabalhos recentes em outros lugares do mundo, podem sugerir uma origem metamórfica ou ígnea para o coríndon. Observa-se no diagrama da

Figura 3.7, que os resultados obtidos para as amostras de coríndon de Barra Velha e Indaiá situam-se no campo metamórfico de Sutherland *et al.* (1998).

O espectro resultante da análise na faixa ultravioleta–visível-infravermelho próximo pode auxiliar na identificação de coríndon derivado de processos metamórficos. Neste caso o coríndon de Barra Velha e Indaiá, comparados com outros depósitos do mundo, apresentam comportamento característico de zonas metamórficas, conforme pode ser observado na Figura 3.8.

Apesar de não existir ainda um conhecimento completo desses depósitos, as evidências aqui reunidas sugerem, a princípio, uma relação genética com as rochas granulíticas que são o litotipo mais comum nas regiões de Barra Velha e de Indaiá. A granulitização que afetou estas rochas poderia ter afetado também sedimentos preexistentes ricos em alumínio, gerando desta forma coríndon a partir de minerais aluminosos. De acordo com Boyle (1976), minerais como o coríndon, a cianita e a cordierita entre os principais, são desenvolvidos em terrenos arqueanos, metamórficos de alto grau, especialmente em sedimentos pelíticos e rochas enriquecidas em alumínio. As rochas granulíticas de Santa Catarina e de Minas Gerais, nas regiões estudadas, estão relacionadas possivelmente à evolução metamórfica de uma seqüência pelítica que foi submetida aos diversos graus do metamorfismo regional.

Apesar da aparente ausência de coríndon entre as rochas granulíticas encontradas em Barra Velha e Indaiá, os dados obtidos neste trabalho são um primeiro indício para uma possível associação dos depósitos secundários com as respectivas encaixantes regionais de alto grau metamórfico.

3.4 AS SAFIRAS NOS DEPÓSITOS DE DIAMANTE ALUVIONAR DA REGIÃO DO RIO COXIM, MATO GROSSO DO SUL, BRASIL *

Antonio Liccardo & João Eduardo Addad

3.4.1 Resumo

Depósitos aluvionares diamantíferos de Coxim, Mato Grosso do sul, contêm grãos de coríndon, variedade safira, em associação com os diamantes. Estas safiras foram analisadas por microsonda eletrônica para Al, Fe, Ti, Cr e Ga. A relação $Cr/Ga < 1$ indica fontes de álcali basaltos para o coríndon, pois as safiras de Coxim apresentam valores abaixo de 1. Teores elevados de ferro, entre 1,03% e 1,26%, e Ti baixo, de 0,00% a 0,31%, sugerem um mecanismo de cor por transferência de carga entre Fe^{2+} e Fe^{3+} , típico para safiras basálticas. A presença de coríndon com características de álcali basaltos indica a possibilidade de existência desta litologia entre as rochas alcalinas da borda da Bacia do Paraná ou nas litologias fonte para sedimentos, como a Formação Aquidauana. Resistência elevada a ataques químicos, dureza e densidade de ambos o coríndon e o diamante, apontam para uma sobrevivência ao retrabalhamento sedimentar e uma convergência deposicional em armadilhas fluviais. O alto grau de arredondamento das safiras de Coxim indica um vetor de transporte de longa distância.

3.4.2 Abstract

Sapphire at diamond alluvionar deposits at Coxim River region, Mato Grosso do Sul, Brasil

Alluvionar diamantiferous deposits of Coxim, Mato Grosso do Sul contain corundum grains, sapphire type, in association with diamonds. These sapphires were analyzed at a electron microprobe to Al, Fe, Ti, Cr and Ga. The relation $Cr/Ga < 1$ indicates alkaline basaltic source to the corundum and the Coxim sapphires presented values around 0,25 - 0,5. High iron content, between 1,03% and 1,26%, and low Ti, from 0,0% to 0,31%, suggests cause of color by charge transfer between Fe^{2+} and Fe^{3+} , typical to basaltic sapphires. The presence of alkaline basalts corundum aim the existence of this litology among the alkaline rocks from the Paraná Basin border or at the source litologies to sediments, as the Aquidauana Formation. High levels of chemical attack resistance, hardness and density of both corundum and diamond, point to a sedimentary reworking survival and a depositional convergence at fluvial traps. The high roundness of the sapphires from Coxim indicates a long distance vector.

3.4.3 Contexto

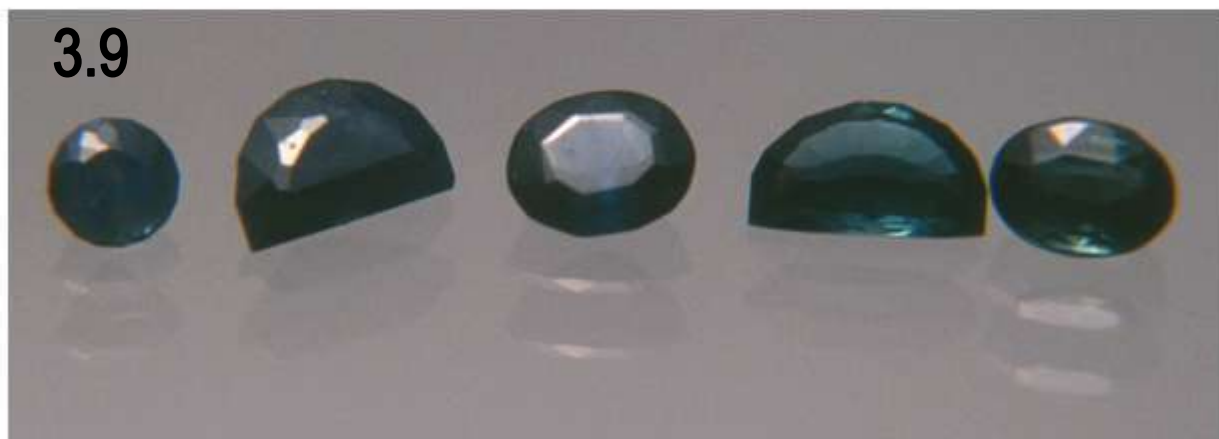
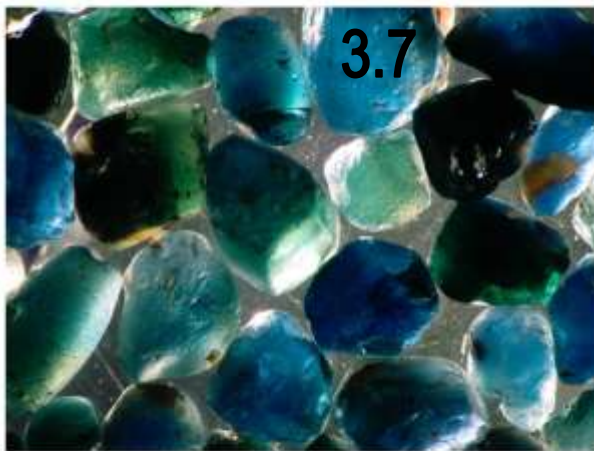
Nos depósitos aluvionares dos rios Coxim, Jauru, Taquari e Piquiri, assim como de alguns de seus afluentes, Mato Grosso do Sul, Brasil, são encontrados grãos de coríndon, variedade safira, associados ao diamante. Esta associação se distribui em alguns trechos fluviais por uma faixa de aproximadamente 110 quilômetros de comprimento no sentido N-S, por 40 quilômetros, W-E (a área de ocorrência situa-se entre as coordenadas 54° 40' e 54° 20', 17° 50' e 18° 55'). Grãos de safira recuperados por garimpeiros nas catas diamantíferas apresentam tamanhos entre 1 e 12 milímetros. A grande parte dos clastos de safira mostra baixo grau de euedrismo, baixa esfericidade, médio a alto arredondamento, sendo os grãos geralmente irregulares, condicionados por fraturamento. Estas safiras exibem cores que variam entre acinzentado, azul, verde, castanho, amarelo, incolor e, raramente violeta. Muitos grãos exibem zoneamento de cor e inclusões, usualmente em faixas paralelamente dispostas ou concêntricas. São comuns os zoneamentos azul - incolor, verde - amarelo e castanho - azul. Amostras destes grãos de safira foram analisadas por microsonda eletrônica, nos modos EDS e/ou WDS, modelos JEOL - JXA8900R no Laboratório de Microanálises, Instituto de Ciências Exatas, UFMG e CAMEBAX SX 50, no Instituto de Geociências da UnB. A tabela 3.2 mostra os resultados obtidos na análise de cinco amostras de coloração azul obtidas nos concentrados diamantíferos da região.

Tabela 3.2 - Resultados de análise química do coríndon, obtidos por microsonda eletrônica (% em peso).

Óxidos	COX-1	COX-2	COX-3	COX-4	COX-5
*Fe ₂ O ₃	1,06	1,23	1,07	1,03	1,26
TiO ₂	0,01	0	0,03	0	0,31
Cr ₂ O ₃	0,02	0	0,02	0	0,01
Ga ₂ O ₃	0,04	0,03	0,05	0	0,04
Al ₂ O ₃	98,77	98,27	99,10	98,11	98,05

* Considerado como Fe total

Foram considerados os elementos alumínio, ferro, titânio, cromo e gálio, na forma de porcentagem em peso de óxidos. A relação cromo/gálio fornece indicação da origem basáltica alcalina para o coríndon, quando é claramente menor que 1, e origem metamórfica quando fica acima deste valor, conforme os estudos de Sutherland *et al.*(1998), Schwartz & Stern (2001) e Sutherland & Schwartz (2000), para as safiras da Austrália e conforme resultados preliminares de Liccardo *et al.*(1999) para outras ocorrências no Brasil. Nas safiras de Coxim, a relação Cr / Ga apresentou valores ao redor de 0,25 - 0,5 , indicando uma origem não-metamórfica, mas de basaltos alcalinos. Tanto a porcentagem alta de Fe, entre 1,03% e 1,26% em peso de óxidos, quanto a extremante baixa de Ti, variando de 0,0% (não detectado) a 0,31%, também sugerem como o mecanismo causador de cor nestas safiras, a transferência de carga entre Fe²⁺ e Fe³⁺, típico de safiras encontradas em terrenos basálticos (Smith *et al.* 1995) em concordância com a presença de quantidades relativamente maiores de Ga. Coríndon encontrado nos basaltos alcalinos tem sua origem na crosta inferior, sendo estas extrusivas apenas transportadores destes xenocristais (Guo *et al.*, 1992), de maneira semelhante aos diamantes em rochas kimberlíticas. A presença de coríndon característico de álcali-basaltos nesta região sugere a existência desta litologia específica, ou de uma extrusiva que tenha desempenhado um papel semelhante, entre as alcalinas da borda da bacia do Paraná ou entre as litologias-fonte para pacotes sedimentares como a Formação Aquidauana. Os graus elevados de resistência a ataques químicos (intemperismo), dureza e densidade de ambos os minerais, diamante e coríndon, determinam a sua sobrevivência a retrabalhamentos sedimentares sucessivos e uma convergência deposicional em armadilhas fluviais, principalmente, determinando o coríndon como acompanhante do diamante aluvionar na área em questão. Entretanto, o coríndon, de modo diferente do diamante, apresenta a sua morfologia e textura superficial como indicadores de transporte, por ser passível de abrasão. O alto grau de arredondamento alcançado pelas safiras de Coxim indica um transporte de longa distância e/ou condicionante de solitação mecânica intensa, ou ainda uma sucessão de retrabalhamentos. Esta característica dificulta a comparação da amplitude de transporte destes dois minerais e a possibilidade de inferência de uma relação parental entre as sua proveniências.



- Fotografia 3.5** – Clastos de coríndon, variedade safira, de concentrados diamantíferos do rio Coxim, MS.
Fotografia 3.6 – Grão de safira com grau médio de euedrismo, formato ‘em barril’, de concentrados diamantíferos.
Fotografia 3.7 – Grãos de safira com zoneamento de cor em faixas, de concentrados diamantíferos.
Fotografia 3.8 – Grãos de safira com zoneamento de cor em faixas, dos concentrados diamantíferos.
Fotografia 3.9 – Exemplares lapidados das safiras. As gemas em meia-lua pesam 1,4ct.

3.5 CORÍNDON DO ESTADO DA BAHIA – BRASIL*

Antonio Liccardo, Júlio César-Mendes, João Addad, Hanna Jordt-Evangelista, Nelson Luiz Chodur

3.5.1 Resumo

Nos últimos anos surgiram várias ocorrências de coríndon dispersas pelo Brasil, entre elas algumas no Estado da Bahia. Destas ocorrências, as de Catingal, Lajedinho e Paraguaçu são focalizadas nesse trabalho, tanto em termos de geologia quanto de caracterização do material dos depósitos. A identificação de inclusões cristalinas através de difração de raios X, análise termodiferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG), além do estudo dos minerais associados encontrados em concentrados de bateia, permitem interpretações quanto à gênese deste material. Análises químicas mostram que os principais elementos traços são Cr, Fe e Ti, que provavelmente são os cromóforos do mineral. Em relação ao depósito secundário de Paraguaçu, considerações sedimentológicas objetivaram definir o processo genético que originou o mineral, provavelmente metamórfico, dada a presença de sillimanita/coríndon intercrescidos. A caracterização do coríndon do Estado da Bahia e as correlações com informações de campo apontam boas possibilidades para a produção desse mineral para fins gemológicos.

3.5.2 Abstract

In the last years many new corundum occurrences werw discovered in Brazil, some of them in the State of Bahia. This paper deals with the geology and the characterization of the material from three occurrences from Bahia known as Catingal, Lajedinho and Paraguaçu. The identification of solid inclusions in the corundum by means of X-ray diffraction, thermodifferential analysis and themogravimetric analysis, besides the study of the associated mineral allow interpretations concerning the genesis of the corundum. Chemical analysis show that the main trace-elements, wich are possibly the color-causing elements, are Cr, Fe and Ti. The deposits of Paraguaçu was also studied in terms of sedimentology and the results, showing sillimanite/corundum in association, point to metamorphic genesis to this mineral. The mineralogical and chemical characterization of the corundum besides the field informations concerning the deposits suggest a high possibility for the production of gem-quality corundum in the State of Bahia.

3.5.3 Introdução

Historicamente, as variedades gemológicas de coríndon são exploradas nos países do sudeste asiático e algumas minas na África e Austrália. O Brasil, apesar de grande produtor de outros minerais gemas, nunca apresentou produção relevante de rubi e safira, mesmo sendo conhecidas ocorrências esparsas em vários pontos de seu território.

Na última década surgiram várias ocorrências dispersas em todo o país, principalmente nos estados de Minas Gerais e Bahia, tradicionais centros produtores de gemas nas Américas. Em outros estados do Brasil, como Santa Catarina e Mato Grosso do Sul várias pesquisas têm sido realizadas. No estado de Minas Gerais, são conhecidas dez ocorrências de coríndon das quais, boa parte apresenta material com potencial gemológico (Liccardo 2000a e 2000b).

O Estado da Bahia apresenta seis ocorrências conhecidas deste mineral. Até então, nenhum estudo mais detalhado foi realizado, existindo apenas o seu cadastramento (Couto 2000). Este trabalho trata das ocorrências de Catingal, Lajedinho e Paraguaçu, descrevendo o material amostrado e sua associação com a geologia local.

3.5.4 Localização

A Figura 3.9 mostra a localização dessas ocorrências no Estado da Bahia. Os depósitos estudados concentram-se na porção centro-sul do estado, sendo o acesso a partir da capital, Salvador, distante respectivamente cerca de 450km para Catingal, aproximadamente 600km para Lajedinho e 400km para Itaetê (Rio Paraguaçu).

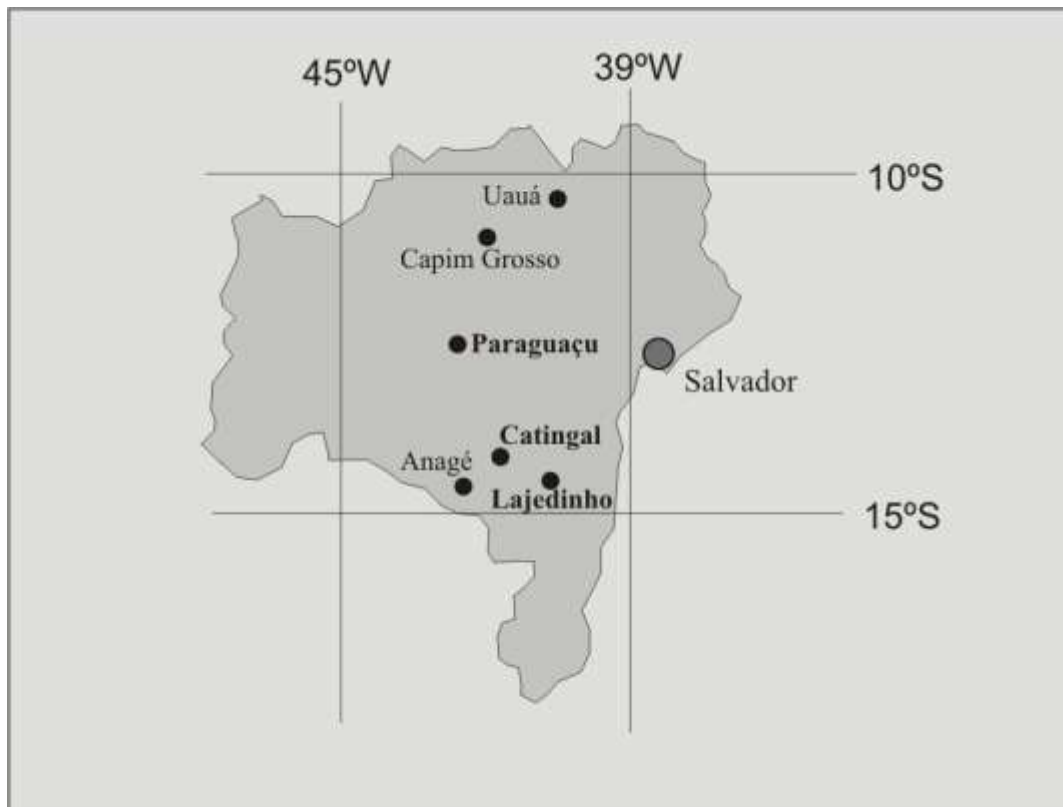


Figura 3.9 - Mapa de localização das principais ocorrências de coríndon no estado da Bahia, Brasil.

3.5.5 Coríndon de Catingal

Recentemente, surgiram no mercado de gemas e minerais de coleção exemplares de coríndon provenientes da localidade de Catingal (13°56'54"S e 40°37'45"S), vizinhanças de Manoel Vitorino, na região centro-sul da Bahia. Essa ocorrência é mencionada há muito tempo em relatórios e estatísticas do setor mineral no estado, não obstante a quase total ausência de dados mais detalhados. O coríndon é encontrado em depósitos primários, como porfiroblastos centimétricos em biotita gnaisses, com auréolas de feldspato em torno desses cristais. O mineral apresenta-se em cristais euédricos e com colorações variando de castanho-escuro até verde amarelado, com alguns mostrando certa transparência. Estudos preliminares foram realizados com o objetivo de caracterizar e verificar a potencialidade gemológica do coríndon de Catingal visando um possível tratamento térmico.

Através de microscópio eletrônico e difratometria de raios X foi possível a constatação das seguintes inclusões sólidas: diásporo, zircão, monazita e óxidos de ferro, provavelmente hematita. A presença de diásporo, que normalmente se concentra em planos de geminação polissintética, parece ser a principal causa da diminuição da transparência nos cristais opacos desse coríndon (Liccardo *et al.* 2000a). Resultados preliminares de análises de microsonda eletrônica mostraram quantidades razoáveis de Fe₂O₃ (1,69 a 1,94% em peso) além da presença restrita de TiO₂ (até 0,02% em peso) e MnO (até 0,04% em peso).

O Fe₂O₃ em teores consideráveis pode ser o agente causador da coloração verde-amarelada e mesmo da tonalidade castanho-escura de certos exemplares. Frequentemente a mistura de tonalidades e a variação de cores desse tipo de material é resultado de mais de um mecanismo de causa de cor. Assim, condições diferentes de tratamento térmico poderiam proporcionar resultados variados, conforme o mecanismo de cor sobre o qual fosse atuar este tratamento. A presença de TiO₂, mesmo que em quantidades baixas, juntamente com o Fe₂O₃, indica a possibilidade de mudança para a cor azul com tratamento térmico adequado, pois esses são os elementos que compõem o principal mecanismo de causa da coloração azul em safiras de outras localidades. Quando exposto à luz ultravioleta, o coríndon de Catingal apresenta reação moderada de cor anil em ondas curtas e também em ondas longas.

3.5.6 Coríndon de Lajedinho

Esse depósito é mencionado no recente Mapa Gemológico da Bahia (Couto 2000). A mineralização de coríndon da fazenda Lajedinho (15°06'34"S e 40°48'36"W), município de Vitória da Conquista, está hospedada em tremolita-actinolita-clorita xisto associado a material de natureza caulínítica e quartzo/calcedônia (Couto 2000). Regionalmente predominam terrenos gnáissicos, arqueanos /paleoproterozóicos, localmente migmatizados, com lentes de rochas básicas e ultrabásicas, geralmente xistificadas, além de rochas calcissilicáticas. Couto (2000) sugere que a paragênese aliada à geologia local da mineralização indica a possibilidade da geração de coríndon plagioclasitos, derivados da interação de pegmatitos quartzo-feldspáticos com rochas básicas, através de processos de dessilicificação. Outra possibilidade genética está relacionada ao metamorfismo regional sobre sedimentos argilosos ricos em alumina, gerador dos xistos mineralizados (Couto 2000). Segundo informações do Departamento Nacional de Produção Mineral deste depósito foram extraídos, pela mineração titular da área, cerca de 200 quilogramas de coríndon.

O material encontrado apresenta-se em cristais prismáticos, euédricos a subédricos com coloração rósea, translúcidos a opacos. Boa parte desse material apresenta aproveitamento gemológico, principalmente na forma de cabochões de tamanho grande e coloração predominantemente rosa escuro. Análises químicas revelaram a presença de teores consideráveis de Cr_2O_3 (variando de 0,10 a 0,13% em peso), o que possivelmente é o agente causador da coloração do material. Além disso, os teores de Fe_2O_3 registrados variaram de 0,08 a 0,15% em peso. Quando exposto à luz ultravioleta, o coríndon de Lajedinho apresenta reação de cor vermelha forte em ondas curtas e muito forte em ondas longas, possivelmente resultante da presença do Cr_2O_3 .

Análises de ATD e ATG realizadas no material produzido em Lajedinho apresentaram uma reação endotérmica e perda de massa entre 450 e 520°C, o que pode ser atribuído à presença de fases hidratadas inclusas no mineral (Liccardo *et al.* 2000b). As inclusões sólidas encontradas foram basicamente rutilo, diásporo, boehmita e moscovita.

3.5.7 Coríndon de Paraguaçu

Os depósitos de coríndon do Rio Paraguaçu estão localizados nas proximidades do município de Itaetê (13°02'44"S e 40°46'55"W). São depósitos coluvionares e aluvionares recentes. Variações quantitativas de minerais pesados derivados da mesma fonte podem determinar características do meio de transporte e informações sobre a fonte dos sedimentos (Addad 2001). Os depósitos coluvionares de Itaetê consistem em areias pouco selecionadas, com grande participação de argila. Os grãos dessa areia se mostram angulosos, caracterizando pouco transporte. Como minerais pesados encontrados nas areias de frações média e fina, foram identificados: sillimanita fibrosa, rutilo, ilmenita, magnetita, zircão e coríndon. Grãos com intercrescimentos sillimanita-rutilo e sillimanita-magnetita são comuns, enquanto que sillimanita-coríndon são raros, mas evidenciam uma possível relação paragenética. Os grãos de coríndon se mostram angulosos e restritos a faixas mais grossas do sedimento.

Os depósitos aluvionares portadores de coríndon do rio Paraguaçu são paleocascalheiras basais da calha fluvial, encontradas em profundidades variáveis entre 3,0 e 8,0m abaixo dos sedimentos atuais, sendo estas cascalheiras capeadas por níveis de areia e argila. Foram analisadas as frações média e fina de cascalheiras obtidas em catas para diamante nas proximidades de Itaetê. Os grãos, inclusive o coríndon, apresentaram-se bem arredondados, indicando transporte e retrabalhamento intenso. Os principais minerais pesados da fração média são: granada almandina (mais abundante), coríndon, rutilo, pirita limonitizada, monazita, xenotímio, zircão e diamante (menos abundante). A morfologia dos grãos de coríndon se mostra condicionada pela maclação polissintética, originando formas romboédricas de cantos arredondados. Em frações areia fina a silte não foram recuperados grãos de coríndon. As inclusões sólidas encontradas nos fragmentos do coríndon de Paraguaçu foram rutilo, monazita, zircão, diásporo e moscovita. Esse coríndon quando exposto à iluminação ultravioleta mostrou fluorescência moderada de cor anil em ondas curtas e moderada de cor púrpura em ondas longas.

3.5.8 Outros Depósitos no Estado da Bahia

Outro jazimento de coríndon que merece referência está situado na fazenda Boa Vista, município de Uauá, sendo a rocha hospedeira hornblenda gabro, em contato com granito gnáissico. Foram examinados no local cristais de coríndon de 0,5 a 2 centímetros, opacos, nas cores azul (Couto 2000). Outras ocorrências conhecidas na Bahia estão situadas próximas aos municípios de Anagé e Capim Grosso.

3.5.9 Considerações Finais

A associação das características mineralógicas e químicas do coríndon com os dados de campo apontam para uma gênese metamórfica para o depósito secundário de Paraguaçu, à semelhança dos depósitos de Lajedinho e Catingal. A identificação das inclusões e o estudo de minerais associados em sedimentos aluvio-coluvionares mostram-se importantes ferramentas para possíveis correlações paragenéticas. É o que foi verificado no caso da relação coríndon/sillimanita nos sedimentos de Paraguaçu. A presença de diáporo como inclusão no material dos três depósitos pode ser o fator causador de perda de transparência nessas gemas. O coríndon das ocorrências de Catingal e Lajedinho apresentou indícios de bom potencial para aproveitamento gemológico e tratamento térmico, conforme também sugerem os resultados das análises químicas. Os elementos traços principais determinados nos espécimes destas localidades, foram Fe, Ti e Cr (elementos causadores de cor), o que aponta para a possibilidade de modificação e melhoramento da cor e transparência por tratamento.

A existência de mais ocorrências na Bahia revela a possibilidade de produção comercial de coríndon nesse estado. A compreensão da composição química e do grau de aplicabilidade dos tratamentos existentes para rubi e safira, pode viabilizar novas jazidas.

CAPÍTULO 4

DEPÓSITOS E ORIGEM

4.1 CORÍNDON EM MINAS GERAIS, BRASIL: CONSIDERAÇÕES SOBRE A ORIGEM E DEPÓSITOS SECUNDÁRIOS *

Antonio Liccardo; João Eduardo Addad & Hanna Jordt-Evangelista

4.1.1 Abstract

CORUNDUM IN MINAS GERAIS, BRAZIL: APPROACH TO ORIGIN AND SECONDARY DEPOSITS

Corundum deposits in the state of Minas Gerais, Brazil are found in the regions of Cláudio-Campo Belo (south), Malacacheta (center) and Caratinga-Manhuaçu (east). Little is known about the genesis and geological context since most of the secondary deposits were only discovered in the last few years. The region of Caratinga-Manhuaçu with the largest number of occurrences is composed of high-grade metamorphic rocks. The absence of the original corundum-bearing rocks is due to their easy alteration and erosion, as common in tropical climate for quartz-free rocks. Comparison to the Catingal deposit in nearby Bahia State, where similar geological units occur, offers the possibility of understanding the origin of corundum in Minas Gerais. In Catingal the mineral is found in unaltered granulite facies gneiss where corundum porphyroblasts are mantled by orthoclase in a plagioclase-perthite-biotite-sillimanite-bearing matrix. A similar origin by high-grade metamorphism of Al-rich and Si-poor metasediments is possible for the deposits in Caratinga-Manhuaçu and Cláudio-Campo Belo regions. As the region of Malacacheta is made up of lower grade metamorphic rocks intruded by granite, a different origin by contact metamorphism and/or metassomatism is possible. Most of the paleoalluvial and paleocolluvial deposits have similar features indicating formation under intense flow and deposition of the corundum clasts in relief traps. Climatic, stratigraphic and structural circumstances were responsible for the formation of relief hollows, which correspond to the areas originally occupied by the eroded corundum-bearing rock. The *modus operandi* of this system allows establishing prospecting controls for this gem-mineral. Comparative studies of the deposits and the association with the regional geology point towards potential zones for new corundum occurrences in Minas Gerais.

Keywords – corundum, ruby, sapphire, alluvial deposits, granulites, Minas Gerais

4.1.2 Resumo

Depósitos de coríndon no estado de Minas Gerais, Brasil, são encontrados nas regiões de Caratinga-Manhuaçu (leste), Cláudio-Campo Belo (sul) e Malacacheta (centro). Sua gênese e contexto geológico são ainda pouco conhecidos, pois a maioria dos depósitos secundários foi descoberta há poucos anos. A região de Caratinga-Manhuaçu, que apresenta o maior número de ocorrências, é composta de rochas metamórficas de alto grau. A ausência de rochas hospedeiras do coríndon se deve a sua fácil alteração, conforme é comum para rochas sem quartzo em clima tropical. Estudo comparativo com o depósito de Catingal, Bahia, onde ocorrem rochas semelhantes, oferece a possibilidade de compreensão da gênese do coríndon em Minas Gerais. Em Catingal o coríndon é encontrado como porfiroblastos envoltos por ortoclásio em gnaisses inalterados de fácies granulito, numa matriz com plagioclásio, pertita, biotita e sillimanita. Uma origem similar por metamorfismo de alto grau de metassedimentos ricos em Al e pobres em Si é possível para o coríndon das regiões de Caratinga-Manhuaçu e Cláudio-Campo Belo. Como a região de Malacacheta é constituída de rochas com menor grau metamórfico intrudidas por granitos, é possível o coríndon ter-se originado por metamorfismo de contato e/ou metassomatismo. A maior parte dos depósitos está associada a paleoaluviões e paleocolúvios com características semelhantes que indicam formação sob condições de fluxo intenso e deposição dos clastos de coríndon em armadilhas de relevo. Circunstâncias climáticas, estratigráficas e estruturais foram responsáveis pela formação de segmentos côncavos no relevo, que correspondem às áreas originalmente ocupadas pela rocha-fonte do coríndon. O *modus operandi* desse sistema permite o estabelecimento de controles na prospecção desse mineral-gema. Estudos comparativos dos depósitos e a associação com a geologia regional apontam zonas potenciais para novas ocorrências de coríndon em Minas Gerais.

Palavras-chave: *coríndon, rubi, safira, depósitos aluvionares, granulitos, Minas Gerais.*

4.1.3 Introdução

A gênese do mineral coríndon é usualmente associada a rochas metamórficas de alto grau, processos metassomáticos ou, ainda, complexos alcalinos e álcali-basálticos. Em 80% dos depósitos no mundo o mineral é encontrado em depósitos secundários, como aluviões, pláceres e colúvios (Hughes 1990), o que dificulta a investigação de sua origem. O estudo dos minerais pesados associados, das inclusões sólidas no próprio coríndon e a sua composição química, especialmente os elementos traços (Schwartz & Stern 2000, Sutherland & Schwartz 2001), tem sido as principais ferramentas utilizadas para essa investigação.

Depósitos de coríndon nunca foram sistematicamente caracterizados ou explorados no Brasil, apesar de ocorrências serem conhecidas e citadas desde Hussak (1917) e Guimarães (1934). Entretanto, nos últimos anos novas ocorrências surgiram em Minas Gerais, um estado com histórica produção de gemas coradas e diamantes.

Os depósitos de Minas Gerais, dos quais alguns são explorados para as variedades gemológicas rubi e safira, apresentam características geomorfológicas bastante semelhantes. Todos são secundários, na sua maioria paleoaluvionares, de distribuição geográfica restrita e com alta concentração de clastos de coríndon. Esse modo de ocorrência determina, em muitos casos, a viabilidade econômica, pois depósitos secundários de gemas, usualmente inconsolidados, mostram uma relativa facilidade mecânica de exploração.

O estudo comparativo dos sistemas deposicionais e a elaboração de um modelo de formação para os diversos depósitos de coríndon em Minas Gerais podem determinar parâmetros para alavancar a prospecção de rubi e safiras no Brasil. Nesse trabalho foram estudadas três áreas de ocorrência em Minas Gerais: Cláudio-Campo Belo, ao sul, Malacacheta, no centro, e Caratinga-Manhuaçu, a leste. A última área, por concentrar o maior número de depósitos (Caputira, Indaiá, Sapucaia e Palmeira), serviu como *locus typicus* na elaboração do modelo genético e deposicional.

4.1.4 Localização

O maior número de depósitos de coríndon situa-se em uma faixa de orientação aproximada norte-sul, na região de Caratinga-Manhuaçu, nas localidades de Indaiá (município de Vargem Alegre), Sapucaia (município de Caratinga), Caputira (município homônimo) e Palmeiras (município de Manhuaçu). Na região central do estado, os depósitos situam-se próximos ao município de Malacacheta e ao sul, nos municípios de Cláudio e Campo Belo. A Figura 4.1 mostra a localização desses depósitos.

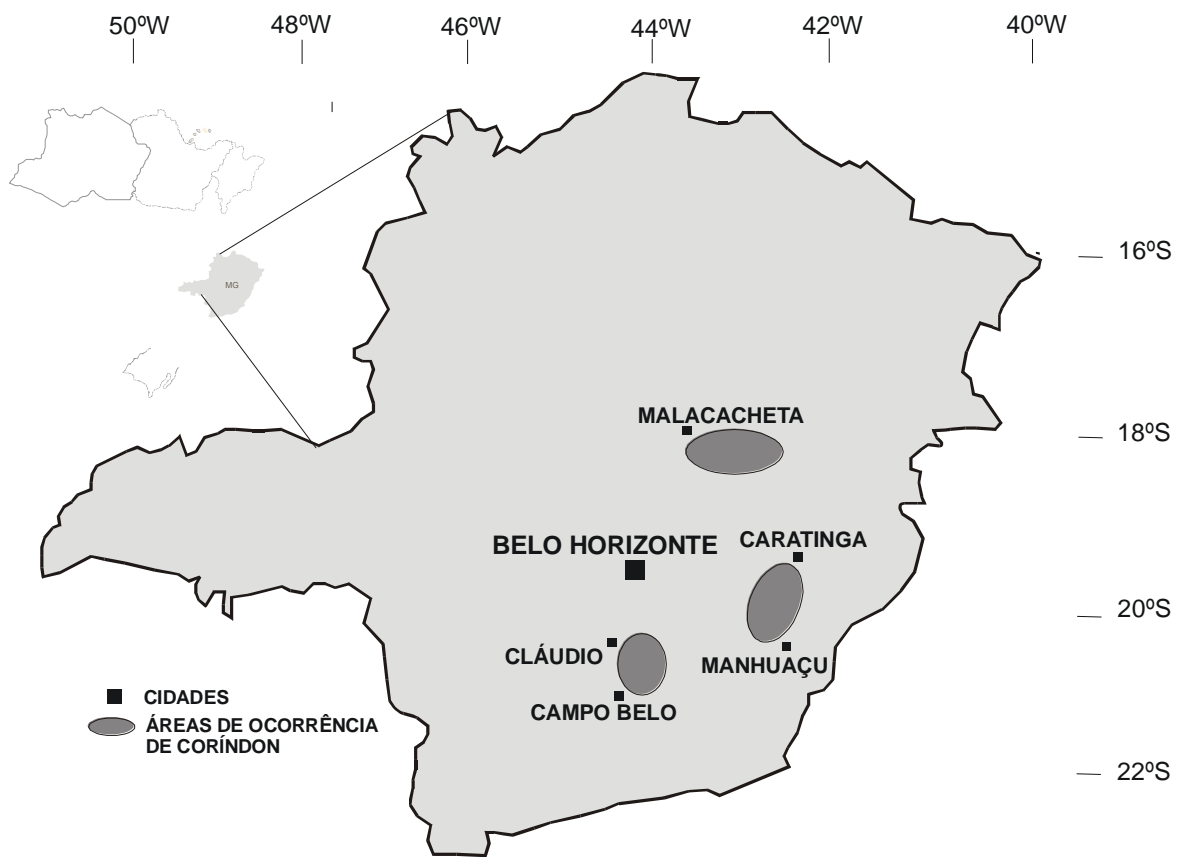


Figura 4.1 Mapa de localização das áreas de ocorrência de coríndon em Minas Gerais estudadas.

4.1.5 Geologia e gênese do coríndon

4.1.5.1 Região de Caratinga-Manhuaçu

Na região de Caratinga-Manhuaçu, os depósitos secundários de coríndon localizam-se em terrenos metamórficos constituídos de biotita gnaisses, granada-biotita gnaisses, migmatitos, granulitos e charnoquitos dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira (Figura 4.2). As litologias fazem parte de blocos crustais formados no Arqueano (Complexo Mantiqueira) e no Paleoproterozóico (Complexo Juiz de Fora) e foram remobilizadas no Brasiliano (680 - 450 Ma) (Cunningham *et al.* 1998 e Fischel *et al.* 1998). Os terrenos são cortados por inúmeros corpos pegmatíticos, muitas vezes portadores de minerais raros como o berilo, inclusive na sua variedade gemológica água marinha.

Em regiões de clima tropical a investigação da gênese do coríndon esbarra na dificuldade de se encontrarem as rochas hospedeiras desse mineral, pois litotipos com coríndon não possuem quartzo, já que os dois minerais são incompatíveis e essa ausência torna as rochas pouco resistentes à alteração e erosão. Rochas com coríndon não foram encontradas na região de Caratinga-Manhuaçu e nem nos outros campos estudados, provavelmente por terem sofrido alteração intempérica. Como os terrenos onde se localizam os depósitos de coríndon são metamórficos de fácies anfibolito superior ou granulito, considera-se que o mineral tenha sido formado nesse ambiente metamórfico. Dentre as rochas estudadas da região de Indaiá (Liccardo, 1999), um biotita-granada granulito, contendo sillimanita e cianita, pode ser considerada aquela com maior semelhança, em termos químicos, com litotipos portadores de coríndon, por ser rica em alumínio e relativamente empobrecida em sílica. No entanto, mesmo esse litotipo contém algum quartzo e obviamente nenhum coríndon. Em Caputira, Campos (1999) cita a presença de cristais de coríndon dentro de material intensamente alterado, mas com foliação metamórfica preservada.

A cerca de 20 km da localidade de Catingal, vizinhanças de Manoel Vitorino, na região centro-sul da Bahia, ocorre um depósito de coríndon cuja rocha hospedeira, inalterada, é um biotita gnaiss de fácies granulito (Liccardo *et al.*, 2001 e Jordt-Evangelista e Liccardo, 2002). Como os terrenos metamórficos do centro-sul baiano são semelhantes, em termos geológicos, aos de Caratinga-Manhuaçu, é possível que nos campos de Minas Gerais a rocha hospedeira e, conseqüentemente, a gênese do coríndon, seja semelhante a de Catingal. O gnaiss de Catingal é composto de álcali-feldspato perítico a mesopertítico (cerca de 43% em volume), plagioclásio (30%), biotita (20%), coríndon (5%), sillimanita (2%) e traços de zircão, monazita e mineral opaco, este intercrescido com espinélio verde. O coríndon constitui porfiroblastos idioblásticos, comumente emoldurados por agregado de grãos de álcali-feldspato (Fig. 4.3, 4.4 e 4.5). Duas reações podem ter gerado a paragênese encontrada no gnaiss de Catingal:

(1) Moscovita + quartzo = ortoclásio + sillimanita + H₂O.

Para pressões de 3 a 6 kbar essa reação ocorre entre cerca de 650 e 700°C, formando sillimanita e parte do álcali-feldspato da rocha. No caso de quantidade insuficiente de quartzo, o que é indicado pela ausência do mesmo nas amostras estudadas, a moscovita não consumida na reação (1) pode ter-se decomposto totalmente em coríndon e álcali-feldspato adicional segundo a reação:

(2) Moscovita = ortoclásio + coríndon + H₂O.

A segunda reação ocorre em temperaturas um pouco mais elevadas, entre 680°C e 750°C, o que permite concluir que o coríndon de Catingal é metamórfico de alto grau, o que é corroborado pelo espinélio, mineral típico da fácies granulito.

Gênese semelhante à de Catingal é possível para o coríndon encontrado em colúvios e aluviões na região de Caratinga – Manhuaçu. Estudos geoquímicos envolvendo elementos-traços do coríndon daquela região indicam uma origem metamórfica, corroborada em alguns casos pelas inclusões minerais, como polimorfos de Al₂SiO₅ encontrados em safiras de Indaiá (Liccardo, 1999). As relações Cr/Ga versus Fe/Ti para o material de Indaiá, Caputira, Sapucaia e Palmeiras estão de acordo com uma origem associada a metamorfismo regional (Liccardo & Jordt-Evangelista, 2000), em consonância com as investigações realizadas em vários depósitos em outras partes do mundo (Sutherland & Schwartz, 2001; Schwartz & Stern, 2000).

O coríndon encontrado em Caputira, de coloração vermelho-marrom, não apresenta qualidade gemológica em virtude de excesso de inclusões, principalmente rutilo. Em Sapucaia e Palmeiras, no entanto, boa parte do material produzido é próprio para lapidação, à semelhança de Indaiá, ocorrência já conhecida no meio gemológico (Epstein *et al.* 1994). Tratamentos térmicos podem ser aplicados nas safiras produzidas nessas localidades, viabilizando sua exploração em maior escala.

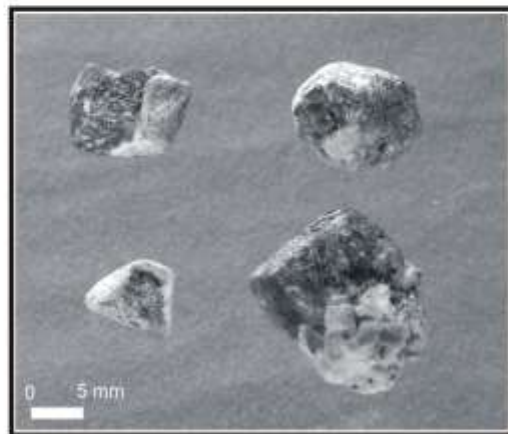
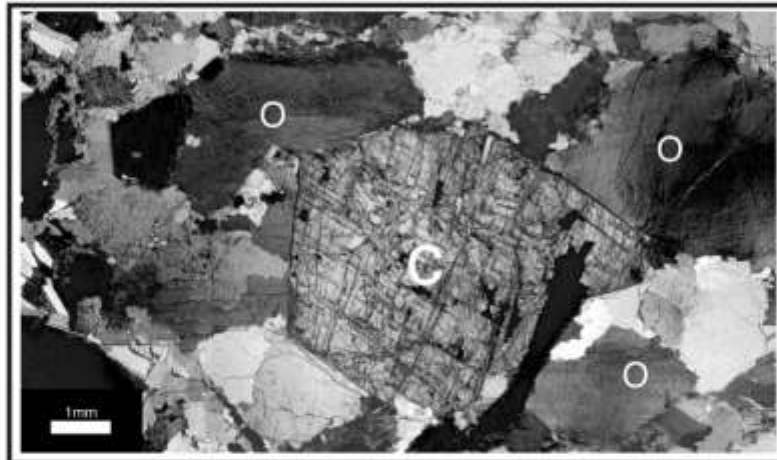
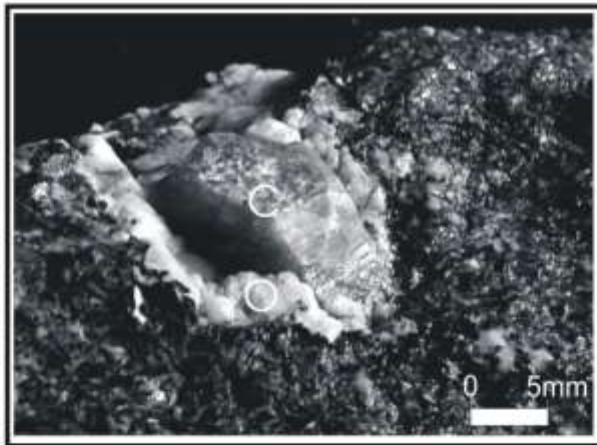


Figura 4.3 Cristal de corindon (C) em granulito de Catingal,BA, envolto por feldspato (O).

Figura 4.4 Fotomicrografia do granulito de Catingal, Bahia, mostrando corindon (C) com auréola de ortoclásio (O).

Figura 4.5 Cristais de corindon com restos de matriz caulinitica (A - Caputira; C - Indaiá), micácea (B - Sapucaia) e feldspática (D - Catingal).

4.1.5.2 Região de Malacacheta

Na região de Malacacheta, o coríndon em sua variedade gemológica safira se apresenta euédrico, sem sinais de transporte e liberados de restos da rocha-fonte. Associada ao coríndon ocorre mineralização de crisoberilo, inclusive na sua variedade gemológica alexandrita. As safiras azuis/incolores produzidas há anos como sub-produto nos garimpos de alexandrita são de boa qualidade gemológica, apesar de pequenas (cerca de 80% dos cristais são menores que 1cm, resultando quase sempre em gemas com menos de 1ct). Com pronunciado zonamento de cor, esse material é próprio para tratamento térmico sistemático, que propicia a uniformização e intensificação da cor azul.

Basílio (1999) e Basílio *et al.* (2000) descrevem o nível mineralizado em alexandrita e coríndon como um paleoaluvião composto por matacões e seixos de composição variada e consideram os depósitos aluvionares recentes como retrabalhamento de paleoaluviões. Os depósitos localizam-se em terrenos compostos por metassedimentos neoproterozóicos das formações Salinas e Capelinha, respectivamente quartzo-mica xistos e quartzitos (Figura 4.6). As formações apresentam intercalação de xistos grafitosos e aluminosos e foram intrudidas por granitos anatócticos de idade brasileira (Basílio 1999). O mesmo autor não encontrou a rocha-fonte do crisoberilo ou do coríndon, provavelmente por ter sido totalmente intemperizada e erodida. A presença de um corpo granítico intrusivo em rochas metassedimentares de composição aluminosa poderia ser o responsável pelo aquecimento e cristalização desses minerais por metamorfismo termal. Outra possibilidade é a de que a formação seja resultante do metamorfismo regional, tal como discutido para o campo de Caratinga-Manhuaçu. Liccardo & Jordt-Evangelista (2001) descrevem a presença de polimorfo de Al_2SiO_5 como inclusão sólida em safiras de Malacacheta, identificada por MEV/EDS, o que corrobora essa hipótese. Nesse caso o coríndon e o crisoberilo poderiam ter se originado por processos genéticos diferentes, conforme a hipótese de Basílio (1999) para o crisoberilo, apesar de ambos minerais apresentarem semelhanças químicas e deposicionais.

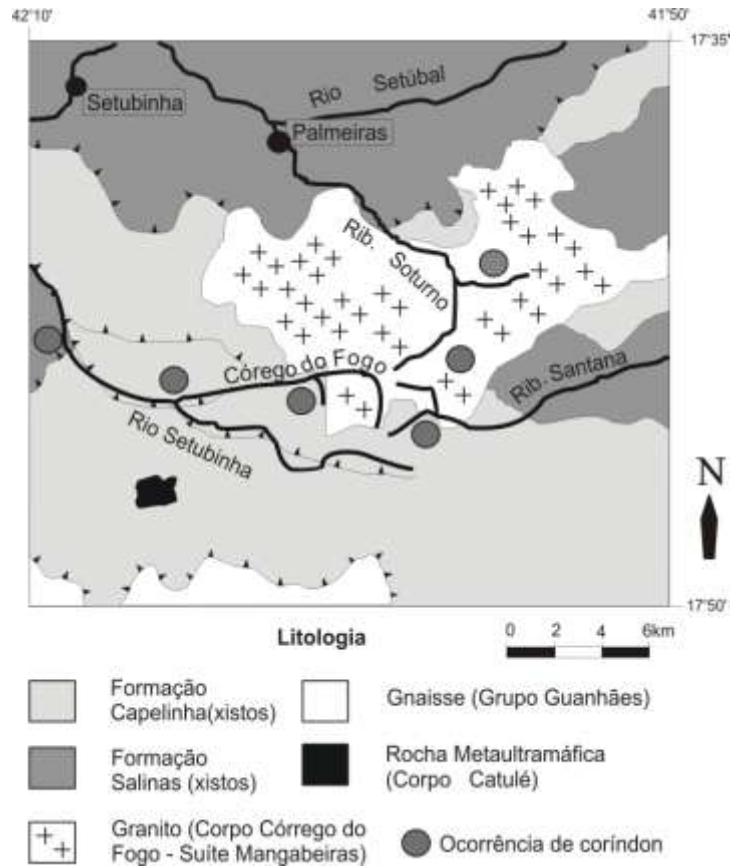


Figura 4.6– Esboço geológico da região de Malacacheta (Basílio, 1999).

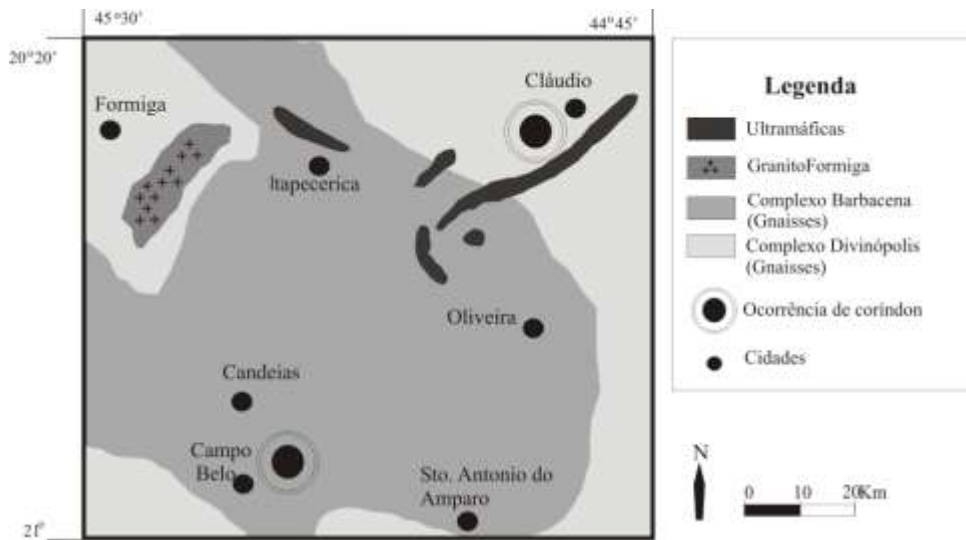


Figura 4.7 – Esboço geológico da região de Cláudio-Campo Belo (Souza, 2002).

4.1.5.3 Região de Cláudio-Campo Belo

A região de Cláudio-Campo Belo é constituída por complexo metamórfico de idade paleoproterozóica a neoarquena (Pedrosa-Soares *et al.* 1994). Nesse complexo de rochas de alto grau também há corpos ultramáficos e intrusivas granitóides. O coríndon ocorre em depósitos secundários, provenientes da decomposição dessas litologias, em solos e em cascalheiras de planícies aluvionares recentes.

Na região de Cláudio, Souza (2002) e Goulart (2002) descrevem o Gnaiss Cláudio e a presença de corpos ultramáficos e gabronoritos na área de ocorrência do coríndon (Fig.4.7). O gnaiss apresenta alternância de bandas leucocráticas e melanocráticas e é composto principalmente por plagioclásio, microclina e quartzo, com presença ainda de biotita, anfibólio, clorita, epidoto, allanita e apatita.. Os ultramafitos são constituídos principalmente por anfibólitos e ortopiroxênio e ainda espinélio, sericita, clorita e epidoto. Os gabronoritos apresentam-se na forma de diques com direção preferencial N50W. Os mesmos autores relacionaram os gnaisses à primeira geração de rochas félsicas do Cráton São Francisco Meridional, cristalizadas durante o Mesoarqueano. As rochas ultramáficas foram relacionadas a eventos ocorridos no Neoarqueano e as máficas têm sua gênese relacionada a dois pulsos magmáticos respectivamente no Neoarqueano e durante o evento Transamazônico.

O relevo na região do coríndon em Cláudio é suave, transicional entre vertentes e rampas e planícies aluvionares. Esse mineral é encontrado disperso no solo e raramente observam-se cristais encaixados em rocha muito alterada com foliação metamórfica preservada. Nesse caso, os grãos estão envolvidos por capa alterada, caulínítica, que facilita a sua liberação da encaixante. Os cristais apresentam coloração castanho-avermelhada, são euédricos, com até 10cm de comprimento e zonamento de cor pronunciado.

Em Campo Belo, grãos de coríndon são encontrados dispersos em solo castanho-claro, totalmente liberados de sua encaixante, em área de latossolos e relevo com topos planos e encostas suaves. O coríndon apresenta tamanho variável, chegando a 14mm de comprimento e diâmetro de até 8mm. Os cristais se mostram euédricos, na forma típica de “barril” de seção hexagonal e cor azul clara, com possibilidades de aproveitamento gemológico. O caráter euédrico dos grãos e as bordas agudas de fragmentos partidos indicam transporte quase nulo, ou seja, proximidade da rocha-fonte. As rochas aflorantes nas proximidades são gnaisses de tonalidade esverdeada, com bandas leucocráticas e melanocráticas, com intrusões graníticas e enclaves anfibolíticos. Essas rochas sofreram metamorfismo de fácies granulito, por vezes com retrometamorfismo para fácies anfibolito e xisto verde (Souza, 2002). A

gênese do coríndon, na região de Cláudio-Campo Belo pode estar associada a metamorfismo regional de alto grau, condizente com a história geológica da região, de modo semelhante ao que se interpretou para o campo Caratinga-Manhuaçu.

4.1.6 Os Depósitos de Coríndon

A grande maioria dos depósitos estudados de coríndon está associada a paleoaluviões, com características que indicam a sua formação sob condições de fluxo intenso e retrabalhamento. De um modo geral, 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.

Quanto aos aspectos sedimentológicos, a maior parte dos depósitos constitui-se de cascalheiras com seixos decimétricos, que ocupam paleofundos de vales restritos. São depósitos que se estendem por algumas dezenas ou centenas de metros e com distribuição extremamente localizada dos trechos mineralizados. Estas cascalheiras formaram-se por deposição sob condições de fluxo intenso e eventual, associada a variações climáticas de períodos mais secos para mais úmidos durante o final do Pleistoceno e início do Holoceno (Addad, 2001).

Os depósitos distribuídos na região de Caratinga-Manhuaçu apresentam semelhanças no modo de ocorrência. Em termos geomorfológicos, encontram-se em vales suspensos e/ou encaixados, onde obstáculos ou constrições provocaram a retenção de sedimentos psamíticos/psefíticos em armadilhas de relevo. Este cenário determinou a concentração local de clastos maiores e de minerais de maior peso específico como coríndon e ilmenita acumulados em determinados trechos do sistema aluvionar. Morfologias sem a presença de um efeito de armadilha, determinariam a dispersão dos clastos a jusante do sistema.

Os níveis mineralizados correspondem a horizontes basais de paleoaluviões, exibindo uma granodecrescência geral. São horizontes rudáceos compostos por seixos e blocos de gnaisses e quartzo, além de matriz argilo-arenosa. Esses depósitos apresentam, em recobrimento ou lateralmente posicionados, areias com estratificações cruzadas tangenciais ou acanaladas, níveis enriquecidos em minerais pesados (basicamente ilmenita), areias maciças com seixos esparsos e mostram ausência de depósitos expressivos de continuidade lateral. As características encontradas sugerem sistemas fluviais tipo entrelaçado e os paleoaluviões se encontram recobertos por aluviões atuais, incluindo sistemas paludares associados (brejos). São observados paleoníveis de cascalho de até dois metros de espessura, nem sempre contínuos verticalmente, posicionados a profundidades entre dois e cinco metros a partir das

superfícies atuais. Depósitos típicos deste modo de ocorrência são Palmeiras e Sapucaia, além da porção distal de Indaiá (Figura 4.8).

Os depósitos de colúvio apresentam um maior controle pela morfologia local, com características particulares para cada ocorrência. Enquanto que o depósito de Caputira é extremamente proximal, localizado na parte superior de uma rampa de colúvio, com feições de coalescência com outros segmentos coluvionares, o depósito de Indaiá apresenta colúvio posicionado em uma rampa de alúvio-colúvio, ocupando a porção mediana de um segmento côncavo (*hollow*). Seus paleoaluviões correspondem, como anteriormente citado, às porções mais distais deste sistema, do mesmo modo que Palmeiras e Sapucaia.

Circunstâncias climáticas, estratigráficas e estruturais seriam responsáveis pela formação dos segmentos côncavos, que apresentam maior recuo que as encostas convexas associadas (*noses*). Os segmentos côncavos constituiriam as áreas fontes dos depósitos coluvionares encosta abaixo. Neste cenário, a rocha geradora do coríndon teria sido retrabalhada, fornecendo clastos para os paleosistemas sedimentares. A rocha portadora do coríndon, de maior susceptibilidade intempérica, seria, portanto, preferencialmente eliminada como tal. Na região de Caratinga-Manhuaçu, os quatro depósitos considerados, Caputira, Indaiá, Sapucaia e Palmeira, representam estágios sucessivos entre um colúvio proximal e um aluvião intermediário (Figura 4.8) desse paleosistema deposicional.

Em Malacacheta o coríndon é encontrado em níveis de terraços que correspondem a paleoaluviões, ao longo dos atuais Córrego do Fogo e Ribeirão Soturno e afluentes. Os paleoaluviões foram retrabalhados pelo fluxo recente, formando camadas de cascalho que ocupam a base dos sedimentos das drenagens atuais. Porções mineralizadas ocorrem tanto nos paleoaluviões quanto nos aluviões recentes.

Os depósitos secundários de Cláudio-Campo Belo são caracteristicamente eluvionares-coluvionares. Os grãos de coríndon são encontrados nos latossolos e regolitos, em topos planos e encostas suaves. Em Corumbá, distrito de Cláudio, a partir do material destas feições é alimentado um sistema de drenagem local. Este sistema oferece oportunidade para a concentração dos clastos de coríndon, tanto nas cascalheiras atuais quanto nos paleoaluviões. Em Campo Belo as similaridades sugerem mesmo tipo de gênese e deposição que a ocorrência de Cláudio. A Figura 4.8 mostra um sistema de deposição geral, cujo mecanismo é o mesmo para todas as ocorrências, com variações características conforme a distância da área-fonte.

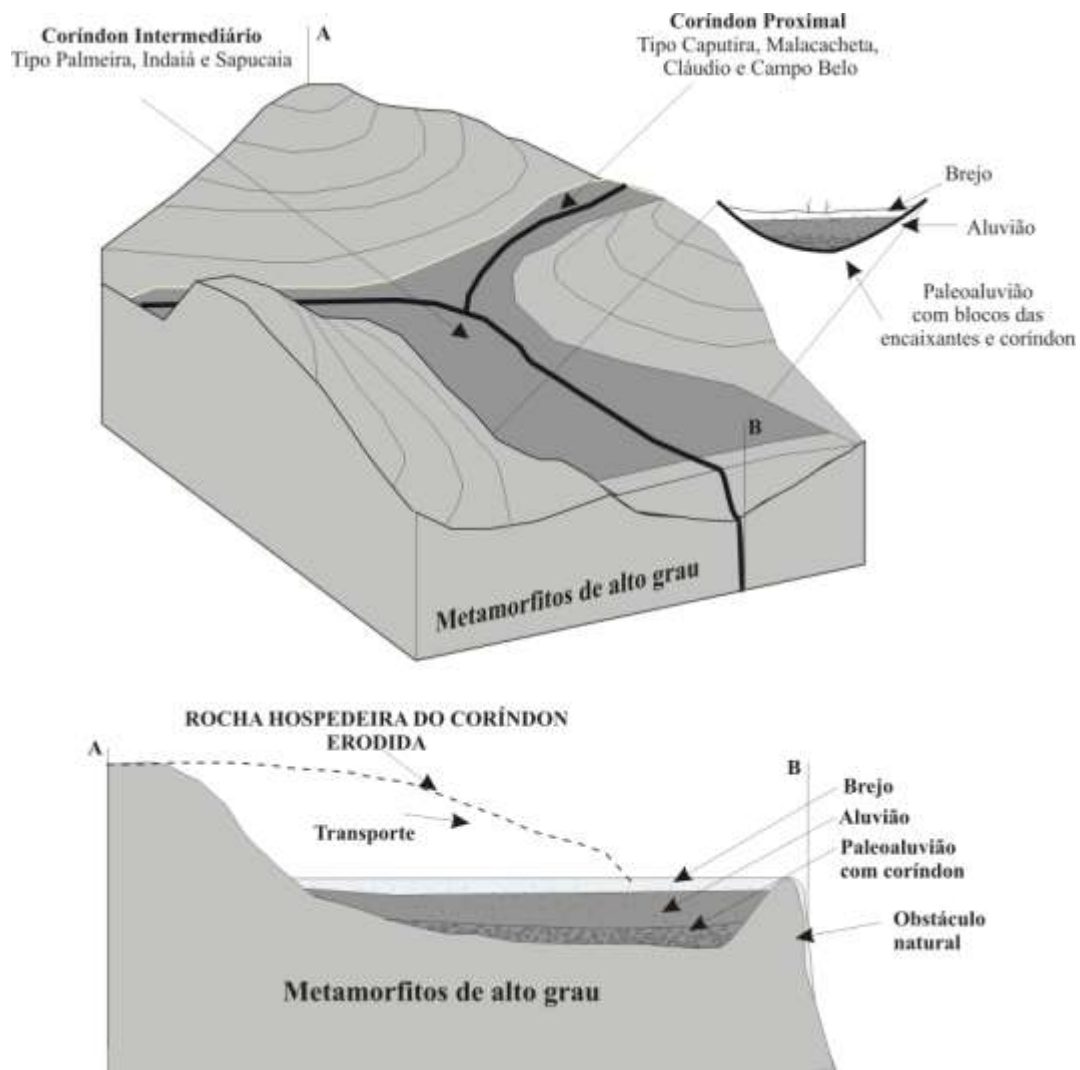


Figura 4.8– Modelo mostrando a tipologia geral dos depósitos secundários e mecanismo de concentração do coríndon em armadilhas de relevo.

4.1.7 Fatores determinantes da deposição

Durante o Quaternário ocorreram flutuações climáticas que causaram mudanças nas características e/ou intensidade dos processos de denudação, produzindo sedimentos e morfologias distintos. A natureza das mudanças climáticas e a atividade geomorfológica variaram regionalmente. Os ciclos glaciais do Pleistoceno se caracterizaram 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 (macrofósseis vegetais). Turcq *et al.* (1996), através de uma abordagem geomorfológica aliada à datação radiocarbono, indicam um período seco centrado em torno de 20-22000 anos BP. 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 BP.

O fim do Pleistoceno / início do Holoceno é caracterizado, de um modo geral, por uma alteração na magnitude dos fluxos de sedimento devido às mudanças nos regimes hídricos (maior pluviosidade). O término da última 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, *e.g.* Rudoy & Baker, 1993) quanto na passagem de um paleoclima mais árido para os níveis pluviais que se instalaram durante o Holoceno (processo dominante no hemisfério sul) (Frakes, 1979; Clapperton, 1993).

Mello *et al.* (1998) caracterizaram alostratigraficamente os depósitos sedimentares da região do Rio Doce (MG), individualizados por discordâncias erosivas. Estes autores delimitam depósitos fluviais torrenciais/fluxos de detritos no Pleistoceno e depósitos aluvionares/coluvionares relacionados a um importante evento de leques aluviais e canais de baixa sinuosidade no Holoceno inicial a médio. Suguio *et al.* (1993) descrevem episódios erosivos, a partir de 7000 BP, os quais sugerem a instalação de flutuações de curta duração em um paleoclima úmido.

Para a deposição e concentração de coríndon nas ocorrências consideradas, parte-se da premissa que a rocha portadora/geradora desse mineral foi totalmente alterada e que os clastos de coríndon, remanescentes em função de suas características de maior resistência e inatacabilidade, foram concentrados pelos processos de transporte e sedimentação pleistocênicos. As diversas ocorrências estariam em posições diferentes (distal ou proximal) dentro de um processo semelhante, tendo como evidências os sinais de pouco transporte, como angulosidade e euedrismo dos cristais. Indícios para a total alteração da rocha-fonte são as auréolas caulínicas envolvendo cristais de coríndon, constatados nas

ocorrência de Indaiá, Sapucaia, Cláudio e Caputira, que mostram ainda vestígios da rocha original (Figura 4.5).

Armadilhas de relevo são o principal determinante para a concentração do mineral-gema nas cascalheiras dos sistemas paleoaluvionares e o elevado peso específico, característica desse mineral, determina a associação com blocos maiores de quartzo ou fragmentos de rocha. Esse cenário deposicional supõe uma gênese primária espacialmente restrita, em bolsões ou camadas de rochas semelhantes às ainda preservadas, porém mais pobres em sílica e portanto sem quartzo e que foram totalmente intemperizadas e erodidas. Nesses termos, apesar do caráter localizado desses bolsões ou camadas, a possibilidade de existência de outros depósitos com características semelhantes se estende por uma ampla área de ocorrência, principalmente na faixa Caratinga-Manhuaçu.

4.1.8 Considerações Finais

As regiões de ocorrência de coríndon em Minas Gerais apresentam o mesmo grau de dificuldade quanto à determinação da origem do coríndon, em virtude da ausência da rocha-matriz. É provável que esse mineral tenha sido gerado por processos de metamorfismo regional pois os depósitos encontram-se sobrepostos a terrenos metamórficos de médio a alto grau. A gênese por metamorfismo regional de fácies granulito do coríndon encontrado *in situ* em gnaisses de Catingal, BA, pode ser extrapolada para o coríndon dos depósitos secundários das regiões de Caratinga-Manhuaçu e Cláudio-Campo Belo, em virtude das semelhanças geológicas dos terrenos. Apesar das evidências de gênese metamórfica indicada por inclusões de polimorfo de Al_2SiO_5 na safira de Malacacheta (Liccardo & Jordt-Evangelista 2001) o metamorfismo daquela região é de grau mais baixo. Um modelo alternativo metassomático foi proposto por Basílio (1999) para o crisoberilo associado à safira.

As características deposicionais do coríndon nas áreas estudadas, como intemperismo intenso da rocha-mãe com liberação dos cristais, proximidade entre fonte e área de deposição e concentração em armadilhas de relevo são semelhantes, sugerindo controles similares. Os depósitos estão associados a paleoaluviões formados em condições de fluxos torrenciais durante o fim do Pleistoceno e início do Holoceno, apresentando grande concentração de coríndon em áreas espacialmente restritas, mas que em termos geográficos e geológicos se repetem por grande extensões.

Enquanto Malacacheta apresenta poucas ocorrências já conhecidas há décadas, na faixa Caratinga-Manhuaçu o número de depósitos recém-descobertos é maior, distribuindo-se num contexto geológico que se estende ao longo de 200 quilômetros (Figura 4.2). Contexto geológico e geomorfológico semelhante também se encontra na região de Cláudio-Campo Belo, onde o número de ocorrências conhecidas ainda é reduzido.

CAPÍTULO 5

ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 CORÍNDON NO BRASIL – QUÍMICA, INCLUSÕES, ESPECTROSCOPIA E ASPECTOS GENÉTICOS*

Antonio Liccardo, Hanna Jordt-Evangelista, João Eduardo Addad, Ester Figueiredo Oliveira

5.1.1 Abstract

CORUNDUM FROM BRAZIL - CHEMISTRY, INCLUSIONS, SPECTROSCOPY AND CONSTRAINTS ON THE GENESIS

The objective of this work is the investigation of the mineralogical and chemical characteristics of corundum from eleven deposits in Brazil, in order to contribute to the understanding of its origin and to obtain a set of data to be used as a fingerprint to elucidate provenience of unknown samples. In most deposits corundum is recovered from recent sediments but in two cases it is found in the granulite or pegmatite host rock. Trace elements were analyzed by INAA and ICP-OES, solid inclusions by SEM-EDS and absorption spectra were obtained in the range of UV – visible. Spinel and aluminosilicate polymorph inclusions, relatively high Cr/Ga ratios, negative slopes of the UV-visible spectra above 650nm and geological context are suggestive of an origin by granulite facies metamorphism of aluminous sediments for corundum of at least eight deposits. In three cases the mentioned characteristics are lacking or unclear. In one of them a magmatic origin is proved by the occurrence of the corundum in an insaturated alkali-pegmatite host rock. In the other case an association with alkali basalt is suggested by mineral chemistry. In the last case the origin could not be clearly defined by the used parameters, but geological evidence support a genesis by metassomatic processes.

Keywords: trace-elements; corundum in Brazil; inclusions; INAA; UV-Visible.

5.1.2 Introdução

A gênese do coríndon é usualmente associada a rochas metamórficas de alto grau, processos metassomáticos ou, ainda, a complexos alcalinos e álcali-basálticos. Em 80% dos depósitos no mundo, o mineral é encontrado em depósitos secundários, como aluviões, pláceres e colúvios (Hughes, 1990), o que dificulta a investigação de sua origem. O estudo dos minerais pesados associados, das inclusões sólidas e da composição química, especialmente os elementos traços (Schwartz & Stern, 2000, Sutherland & Schwartz 2001), têm sido as principais ferramentas utilizadas para essa investigação.

Composto essencialmente por óxido de alumínio (mais de 97%), sendo que outros elementos, contidos na forma de “impurezas”, são os responsáveis pela variação de cor do mineral, esses elementos menores e traços refletem o processo geológico/geoquímico que deu origem ao coríndon. O coríndon no Brasil, grande produtor de outros minerais-gemas, é ainda pouco conhecido, com ocorrências esparsas e inexploradas. O presente trabalho apresenta os resultados de estudos geológicos mineralógicos, químicos e espectroscópicos do coríndon de onze ocorrências brasileiras, incluindo três descobertas recentemente.

Localizados nas cinco grandes regiões brasileiras (Figura 5.1), os depósitos estudados são:

- Palmeiras, Caputira, Campo Belo, Sapucaia, Indaiá, e Malacacheta, na região sudeste, Estado de Minas Gerais, sendo que nas três últimas há incipiente exploração de safiras.
- Barra Velha, na região sul, Estado de Santa Catarina, com produção de rubi e safira rosa de qualidade comercial.
- Catingal e Lajedinho, na região nordeste, Estado da Bahia;
- Coxim, na região centro-oeste, Estado do Mato Grosso do Sul, com produção de safiras azul e amarela.
- Peixe, na região norte, Estado do Tocantins.

Exceto Peixe e Catingal, os depósitos são secundários e não apresentam resquícios da rocha original hospedeira do coríndon. As ocorrências de Palmeiras, Indaiá, Sapucaia e Caputira, localizadas na porção leste de Minas Gerais, são próximas entre si e pertencem a contextos geológicos muito semelhantes, em terrenos metamórficos de alto grau, compostos de gnaisses, granulitos e enderbitos (Liccardo, 1999; Liccardo & Jordt-Evangelista, 2000). A ocorrência de Campo Belo, no centro-sul de Minas Gerais, também encontra-se em colúvios e aluviões sobre rochas granulíticas, com presença de corpos

ultramáficos (Liccardo *et al.* 2003). Em Malacacheta, centro-norte do estado, safiras são encontradas em aluviões associados a terrenos altamente intemperizados, sem afloramentos de rochas encaixantes. No contexto regional as rochas são metamórficas de médio a alto grau com presença de corpos graníticos intrusivos (Basílio, 1999).

Em Barra Velha, ao norte de Santa Catarina, o coríndon encontra-se em fácies proximais de sedimentos recentes que ocupam vastas planícies aluvionares. Esses depósitos têm sua origem associada a complexos de rochas granulíticas predominantes em toda a região (Chodur, 1997; Chodur & Liccardo 2000).

No Estado da Bahia, o coríndon encontra-se em depósitos sedimentares recentes em Lajedinho, ao sul, associados a rochas gnáissicas de fácies granulito. Na porção central do Estado, na localidade de Catingal, o mineral ocorre como porfiroblastos em paragnaisses granulíticos, de protólito pelítico (Jordt-Evangelista & Liccardo, 2002). A paragênese mineral é coríndon, álcali-feldspato, plagioclásio, biotita e sillimanita. Essa é uma das poucas ocorrências em que o coríndon é encontrado em rocha inalterada, sendo a outra a de Peixe (Tocantins).

Em Coxim, leste do Mato Grosso do Sul, o coríndon é encontrado nos depósitos aluvionares como mineral-satélite em minerações de diamante. Não existem evidências que possam indicar possíveis rochas encaixantes, ocorrendo regionalmente somente pacotes de rochas sedimentares, que poderiam conter tanto o coríndon quanto o diamante (Liccardo & Addad, 2002).

No sul do Tocantins, na região do Rio do Peixe, encontram-se cristais centimétricos de coríndon em rochas pegmatíticas associadas a complexos alcalinos (biotita-nefelina sienito e dioritos). O pegmatito é pouco diferenciado e apresenta em sua composição 75% de oligoclásio, 10% de Fe-biotita e 10% de coríndon. Piroxênio, moscovita, allanita e zircão perfazem 5% (Kitajima, 2002).

O objetivo desse trabalho é a obtenção de assinaturas geoquímicas (*chemical fingerprints*) resultantes do estudo comparativo da composição química e do comportamento espectroscópico que, aliadas à caracterização das inclusões sólidas do coríndon das diversas ocorrências, servirá de base para interpretar o ambiente de formação dessas ocorrências. As ocorrências de Catingal e Peixe, por apresentarem o coríndon encaixado na rocha original, podem oferecer subsídios para o entendimento dos outros depósitos.



Figura 5.1 – Mapa do Brasil com a localização das ocorrências e depósitos de coríndon estudados.

5.1.3 Metodologia

5.1.3.1 Seleção e preparação das amostras

As amostras utilizadas neste trabalho foram obtidas por coleta sistemática, através de peneiramento e concentração, nos depósitos aluvionares e coluvionares das ocorrências, à exceção de Catingal e Peixe, onde o coríndon é encontrado também encaixado em rocha matriz. Devido à presença de inclusões, cristais com transparência são bastante raros, o que limitou a quantidade de material apropriado para as análises. Cinco amostras de cada ocorrência, à exceção de Coxim (3 amostras) e Peixe (2 amostras), foram utilizadas para o INAA. Apenas uma de cada foi destinada à análise por ICP, exceto Coxim (2 amostras). Para o MEV e UV-Visível foram preparadas dez lâminas do material de cada ocorrência, exceto Coxim (3 lâminas) e Peixe (2 lâminas).

Em relação à coloração, foram utilizadas amostras representativas para cada ocorrência, ou seja: safiras de coloração azul-violeta de Palmeiras, Indaiá e Sapucaia; safiras rosa-castanho de Caputira, Barra Velha e Lajedinho; safiras azuis de Campo Belo, Malacacheta, Coxim e Peixe; safiras castanho-esverdeadas de Catingal.

A preparação do material para o INAA visou a máxima purificação das amostras, procurando-se eliminar não só as impurezas externas, mas também as grandes inclusões. Inicialmente as amostras foram pulverizadas em uma granulometria de aproximadamente 100 mesh, utilizando-se graal de diamonite. Em seguida foram lavadas com ácido fluorídrico concentrado e depois imersas em uma solução de ácido nítrico, ácido perclórico e ácido sulfúrico, na qual foi gotejado peróxido de hidrogênio. Posteriormente o material resultante foi separado por diferença de densidade, utilizando-se bromofórmio. Enfim foi lavado com uma solução diluída de NH_4OH e ainda, com uma mistura de álcool, acetona e água destilada.

A moagem do material destinado às análises de ICP foi realizada em moinho de esfera de cerâmica, evitando-se a contaminação por metais. Do pó obtido (cerca de 300 mesh) foram pesados 500mg, que foram fundidos juntamente com 5g de tetraborato de lítio à temperatura de 1000°C , em cadinho de platina. O material resultante foi dissolvido em 200ml de água com 5ml de H_2SO_4 e depois separado em volumes de 200ml.

Para as análises em MEV/EDS o mineral foi cortado em pequenas chapas e polido em disco diamantado. Uma observação preliminar em lupa binocular permitiu a seleção das chapas destinadas à

metalização com grafite, necessária ao uso dessa técnica. Chapas com maior transparência foram padronizadas com 2mm de diâmetro, cortadas perpendicularmente ao eixo *c* para a realização dos espectros UV-Visível.

5.1.3.2 Métodos Analíticos

A - INAA

Para a determinação da composição química elementar em teores de traço, foi aplicada a ativação neutrônica instrumental (INAA), utilizando-se o método paramétrico (κ_0). Essa técnica tem sido utilizada extensivamente como ferramenta na detecção de elementos traços em minerais e é especialmente vantajosa no caso de coríndon, em virtude desse mineral apresentar uma matriz relativamente simples.

As amostras de coríndon, padrões e materiais de referência certificados foram irradiados no reator TRIGA MARK-I IPR-R1 (CDTN/CNEN, Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, de Belo Horizonte, MG), em uma mesa giratória, em torno do núcleo do reator sob um fluxo de nêutrons térmicos uniforme de $6,6 \times 10^{11} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$. As análises foram acompanhadas de soluções padrões multielementares de terras-raras, tório e materiais de referência certificados. Foram utilizados como referência padrões geológicos USGS (United States Geological Survey): GXR-5 e IAEA (International Atomic Energy Agency): Soil-1, Soil-3, Soil-7. Todas as amostras de coríndon, padrões e materiais de referência certificados foram pesados com uma massa de 0,3000 g e acondicionados em tubos de irradiação adequados.

Essa técnica é apropriada para a quantificação de elementos traços, com resultados excepcionais para elementos Terras Raras (na ordem de ppm, com incertezas menores que 4%). A metodologia adotada é apresentada na tabela abaixo e baseia-se nas experiências do Setor de Radioquímica do CDTN/CNEN em análise por ativação neutrônica de diversas matrizes. Os limites de detecção para os elementos analisados são Cr 300ppb, Fe 4000 ppb, Ga 72ppb, Na 9ppb, Tb 15ppb, Th 12ppb, Ce 300ppb, La 20ppb, W 34ppb, As 45ppb, Ta 11ppb, Sb 2ppb, 1ppb, Co 1ppb.

Na investigação dos elementos de meia-vida curta o tempo de irradiação foi de 5min, de espera 15 min e de contagem 600s. Para os elementos de meia-vida média o tempo de irradiação foi de 4 horas, de espera 12 horas e de contagem 1 hora. Para os de meia-vida longa o tempo de irradiação foi de 16 horas, de espera 30 dias e de contagem 3 horas.

Os espectros gama foram medidos em um detector HPGe ORTEC modelo 10175-P, FWHM de 1,85 keV para a energia de 1332 keV do ^{60}Co , acoplado a microcomputador por eletrônica apropriada/Maestro II. Os principais elementos investigados foram: Dy, Ba, Ti, As, Mg, V, Al, Mn, Cu, Cl (radionuclídeos meia-vida curta); W, Na, La, Au, Ga, As, K, Th, U (radionuclídeos de meia-vida média); Ce, Tb, Cr, Zn, Sc, Sr, Sb, Cs, Sc, Rb, Fe, Co, Ta, Ag, Eu, Tb (radionuclídeos de meia-vida longa). No entanto, somente para 14 dos citados elementos (Tabela 5.1) os teores estão acima do limite de detecção nas amostras investigadas.

Para a interpretação dos resultados analíticos, os elementos caracterizados foram divididos em três grupos: metais de transição; metais alcalinos, alcalinos terrosos e elementos representativos; terras-raras, incluindo o Th e Ta devido ao comportamento geoquímico semelhante. Para os materiais de referência, os resultados obtidos apresentaram uma boa concordância com os valores certificados (incertezas abaixo de 8%), o que garante a boa qualidade das análises.

B - ICP/OES

A espectrometria atômica em geral é muito utilizada para a determinação de elementos traços em vários materiais, inclusive minerais. Essa técnica detecta as radiações eletromagnéticas (luz) que são absorvidas e/ou emitidas por átomos da amostra. A espectrometria de emissão óptica (OES) é uma das possibilidades de associação em plasma indutivamente acoplado (ICP). Em ICP-OES, a luz emitida pelos átomos e íons excitados no plasma é medida para obter a concentração de elementos na amostra. As amostras excitadas no plasma emitem luz em diferentes comprimentos de onda, sendo por isso a emissão policromada. Essa radiação policromada deve ser separada em comprimentos de onda individuais para a identificação do elemento, através de um monocromador (Boss & Fredeen 1999).

Nessa técnica, a amostra dissolvida é decomposta por intenso aquecimento em plasma, gerando átomos livres e íons dos elementos envolvidos. O plasma é uma forma de matéria gerada pela ionização do gás argônio e suas principais características são as de conduzir eletricidade e de ser afetado por campo magnético. A ionização por colisão do gás argônio ocorre em cadeia, quebrando o gás dentro do plasma constituído por átomos de argônio, elétrons e íons de argônio, o que caracteriza o plasma indutivamente acoplado (ICP) e átomos da amostra (Boss & Fredeen 1999).

Amostras sólidas devem ser dissolvidas em ácido para análises em ICP e, em alguns casos, é necessário um processo de abertura por fusão antes da digestão em ácido, procedimento este adotado no caso do mineral coríndon.

O equipamento utilizado foi um Perkin-Elmer Optima 3000, em leitura direta, utilizando os procedimentos do laboratório Lakefield-Geosol, de Belo Horizonte (MG). Foram analisados os elementos Cr, Ti, Mn e V para complementar as análises por INAA.

C - MEV/EDS

Para a análise e identificação das inclusões sólidas do coríndon, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro acoplado (MEV/EDS). É uma metodologia analítica de considerável importância em estudos mineralógicos, tendo em vista que permite a obtenção de imagens da superfície do material analisado sob grandes aumentos, além de fornecer a composição química semi-quantitativa desse material. A imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento e contagem dos elétrons secundários (SE) e retroespalhados (BSE) emitidos pelo material analisado.

Ao MEV pode ser acoplado o sistema de EDS (Energy Dispersive System), o qual possibilita a determinação da composição qualitativa e semiquantitativa das amostras a partir da emissão de raios X característicos. Para possibilitar a condução de corrente elétrica, os minerais não condutores devem ser previamente metalizados. Foi utilizado equipamento Philips, modelo XL-30 com dispositivo EDAX – DXY para a detecção de elementos leves, do LAC- Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento, na Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, PR. A tensão do feixe de elétrons variou de 15 a 20 kV e o vácuo foi de 4×10^{-6} mbar. O vácuo para metalização das amostras foi de 10^{-3} mbar.

D - Espectroscopia

A região do ultravioleta-visível do espectro eletromagnético é a região mais comumente usada em análises espectrométricas de minerais por oferecer boa acurácia, precisão, flexibilidade e baixo custo se comparada com outras técnicas. A luz que atravessa a amostra é analisada, fornecendo registros que variam conforme a composição do material. Excepcionalmente pode-se realizar análises com luz refletida

para amostras opacas, com resultados menos precisos. Os espectros obtidos em luz transmitida proporcionam uma assinatura característica para cada material, além de revelar possíveis mecanismos ou elementos causadores de cor.

Para a espectroscopia UV-Visível realizada neste estudo, foi utilizado o equipamento Hewlett-Packard, Diode Array, modelo 8452A, nos laboratórios de química da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba (PR), calibrado com ar (branco), tempo de integração de 1 segundo e aquisição entre 190 e 820nm. As amostras foram colocadas em porta-amostras padrão, criado especificamente para essas chapas.

5.1.4 Resultados

5.1.4.1 Química

A técnica de INAA, apesar de fornecer resultados muito acurados para múltiplos elementos, não foi capaz de determinar os teores dos elementos Ti, V e Mn, importantes causadores de cor, em função da sobreposição de espectros. Assim, o método de ICP foi aplicado como complementar, principalmente para a determinação do Ti, elemento que participa no mecanismo de causa da cor azul em safiras e cujos resultados em INAA são ofuscados pelo excesso de Al na composição do coríndon.

A - INAA

Os resultados das análises de elementos menores e traços por INAA são apresentados na Tabela 5.1. Verificam-se concentrações significativas dos elementos Tb, Th, Ce e La para as amostras de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Catingal e teores muito baixos ou abaixo do limite de detecção para as outras ocorrências. Algumas amostras de Caputira mostram teores elevados de Tb, e valores significativos de Th. Em uma das amostras de Campo Belo há 10ppm de Th e 1ppm de La. Nas amostras de Peixe, foram encontrados valores de até 5ppm de Th e até 33ppm de Ce, enquanto que em Barra Velha, foram observados até 3ppm de Th e 2-4ppm de La. Uma amostra de Malacacheta apresenta 3ppm de La. Para Coxim e Lajedinho não foram detectados elementos terras raras.

Para o elemento W, teores encontrados em Caputira, Malacacheta e mesmo em Palmeiras são significativos. Palmeiras, Sapucaia e Caputira contêm As. É marcante a presença de Th e Tb nas ocorrências de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Caputira, conjuntamente aos teores constantes e relativamente elevados de Ce e La nas três primeiras.

Dentre os elementos com maior presença, o Na não se mostrou discriminante entre as ocorrências, mas exibiu certa constância (57-177ppm). Entre os teores de Ga, Lajedinho apresenta valores em torno de 27ppm, baixos em comparação às outras ocorrências, cuja variação é de 60 a 307 ppm. Lajedinho também apresenta os menores teores de Fe (637-863ppm), seguida por Peixe (1061-1458), sendo que as outras ocorrências mostram teores entre 2022 e 9703ppm e Catingal chega a 12766ppm.

Em relação aos teores de Cr, Campo Belo, Malacacheta e Coxim mostram valores baixos (1a 9ppm para Coxim) e Caputira e Barra Velha mais elevados, alcançando 3456ppm em Barra Velha. Além dos elementos citados, Ta, Sb, Sc e Co ocorrem em poucas amostras em teores muito baixos.

Tabela 5.1 – Resultados de INAA, em ppm, para elementos menores e traços do coríndon das principais ocorrências brasileiras

Elemento Incerteza (%) Amostra	Cr (2)	Fe (5)	Ga (2)	Na (3)	Tb (5)	Th (3)	Ce (10)	La (4)	W (10)	As (10)	Ta (2)	Sb (9)	Sc (3)	Co (4)	
Palmeiras (rosa)	1	596	2022	71	63	1	8	98	16	1	-	-	1	-	-
	2	1293	3733	114	73	8	51	368	150	4	8	-	4	-	1
	3	707	2302	81	71	8	48	307	126	1	4	-	4	-	-
	4	697	2161	63	67	3	23	123	25	3	-	-	2	-	-
	5	904	2769	54	68	2	9	142	42	2	-	-	1	-	-
Sapucaia (púrpura)	1	54	4603	94	58	-	-	21	3	-	-	-	-	-	-
	2	75	9312	293	169	1	1	28	7	2	3	-	5	-	-
	3	280	4633	104	82	5	5	300	148	-	-	-	-	-	2
	4	149	5700	142	95	1	1	150	206	-	6	-	1	-	-
	5	1092	8302	183	130	4	4	300	15	-	-	-	-	-	-
Indaiá (púrpura)	1	390	2626	93	78	3	29	145	81	-	-	-	4	-	-
	2	215	2631	77	75	1	13	159	69	-	-	-	-	-	-
	3	285	2500	65	64	2	18	81	46	-	-	-	-	-	-
	4	191	3615	60	57	-	9	138	74	-	-	-	-	-	-
	5	233	2714	57	71	-	-	66	19	-	-	-	-	-	-
Caputira (verm. cast.)	1	3310	9703	307	177	29	32	-	-	60	21	37	-	-	-
	2	1037	3677	112	92	-	-	-	-	10	-	12	-	-	-
	3	1182	2571	99	59	-	-	-	3	18	10	3	4	3	-
	4	1320	3045	145	131	10	7	-	-	11	-	5	-	-	-
	5	1243	4173	211	88	-	-	-	-	20	-	8	-	-	-
Campo Belo (azul)	1	11	2644	159	71	-	10	-	1	-	-	-	2	-	-
	2	8	2713	97	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	15	2810	80	64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	10	2675	130	57	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
	5	12	2857	88	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Malacacheta (azul)	1	20	4415	180	69	-	1	-	3	5	-	20	-	-	-
	2	58	3582	192	90	-	-	-	-	4	-	-	-	7	-
	3	25	3847	187	64	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-
	4	32	4132	183	71	-	-	-	-	12	-	-	-	-	-
	5	40	4214	190	67	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-
Coxim (azul)	1	8	6340	156	64	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
	2	1	4572	148	68	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	9	4887	152	71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Catingal (verde cast.)	1	75	9439	95	64	1	10	31	14	6	-	-	3	-	-
	2	81	12766	113	75	-	2	109	46	-	-	1	-	-	-
	3	146	11963	138	107	5	41	70	129	-	-	-	-	-	-
	4	94	10131	98	87	-	13	47	23	-	-	-	-	-	-
	5	103	11317	110	95	-	25	98	85	-	-	-	-	-	-
Lajedinho (rosa)	1	547	637	25	135	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	886	863	29	80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	614	717	27	119	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	735	685	29	98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	669	787	27	107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Barra Velha (rosa)	1	941	4239	89	85	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-
	2	515	2036	103	80	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
	3	3456	3581	70	124	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	4	835	4060	95	96	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-
	5	307	3875	87	88	-	1	-	3	-	-	-	-	-	-
Peixe (cinza azul)	1	2	1061	148	70	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	2	3	1458	165	82	1	5	33	-	-	-	-	-	-	-

* valores com hífen abaixo do limite de detecção

B - ICP-OES

As análises em ICP-OES foram realizadas para quatro elementos específicos (Tabela 5.2), com a finalidade de complementar a caracterização química efetuada com o método INAA, principalmente em relação aos elementos Ti, Mn e V.

Considerando os teores de Cr, também analisados em INAA, é possível verificar que os resultados obtidos pelas duas técnicas são semelhantes. Os resultados para o Ti mostraram uma anomalia em Caputira, com 21480ppm em comparação com a variação de 75 a 405ppm para as demais ocorrências. O Mn varia entre 9 e 35ppm. O V apresenta-se relativamente mais elevado nas amostras de Barra Velha, Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Caputira, atingindo 106ppm nesta última.

Tabela 5.2 - Resultados de ICP-OES, em ppm, para os principais elementos cromóforos do coríndon das ocorrências estudadas.

	Cr	Ti	Mn	V
Palmeiras (rosa)	660	172	9	57
Sapucaia (violeta)	317	361	18	62
Indaiá (púrpura)	251	185	13	44
Caputira (verm.cast.)	902	21480*	13	106
Campo Belo (azul)	35	75	18	13
Malacacheta (azul)	53	392	13	18
Coxim 1 (azul)	48	405	13	13
Coxim 2 (azul-vde.)	9	374	22	9
Catingal (verde-cast)	119	158	22	22
Lajedinho (rosa)	906	75	35	9
Barra Velha (rosa)	35	216	35	35
Peixe (azul-cinza)	26	97	18	13

*Ver explicação no item Discussão

5.1.4.2 Espectroscopia UV-Visível

Nos espectros UV-Visível foram constatadas algumas bandas que, conforme mostram estudos de outras localidades, são características das variedades gemológicas rubi e safiras (Figura 5.2). Os espectros referentes às amostras de Indaiá, Palmeiras e Sapucaia mostram uma banda de absorção entre 370 e 420nm, que em safiras azuis do Sri Lanka, Mianmar, Vietnam e outras (Smith *et al.*, 1995), é associada à presença de Fe³⁺. Coxim, Malacacheta, Catingal e Lajedinho apresentam picos nessa faixa do espectro. Bandas largas entre 500 e 600nm são registradas nos espectros de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá, Lajedinho e Barra Velha, tanto em rubis como em safiras de coloração violeta e/ou com efeito alexandrita.

A presença dessa e de outra anomalia na faixa de 400nm costuma ser associada ao íon Cr^{3+} . Palmeiras e Indaiá apresentam esse comportamento mais evidente. Amostras de Catingal, Caputira e Malacacheta apresentam picos acentuados em 485nm e 585nm.

Para o rubi, sabe-se que as principais áreas de absorção estão localizadas na região do violeta e do azul, ao redor de 400 a 450nm, além de uma banda larga e centrada a 550nm. As amostras de Barra Velha mostram bandas de absorção em 320 e 400nm (região do violeta) que são características do Fe^{+3} , bandas do cromo em 560nm, e uma muito pequena a 693nm, não sendo detectada absorção devida a outros elementos. O espectro mostra ainda uma inflexão negativa a partir de 600nm. Coxim e Catingal foram os únicos a apresentar picos não muito pronunciados em 455nm. Catingal, Campo Belo, Malacacheta e Caputira apresentaram em comum um forte pico em 485nm. A partir da faixa de absorção do laranja-vermelho (600nm em diante) todas as amostras mostraram comportamento linear semelhante.

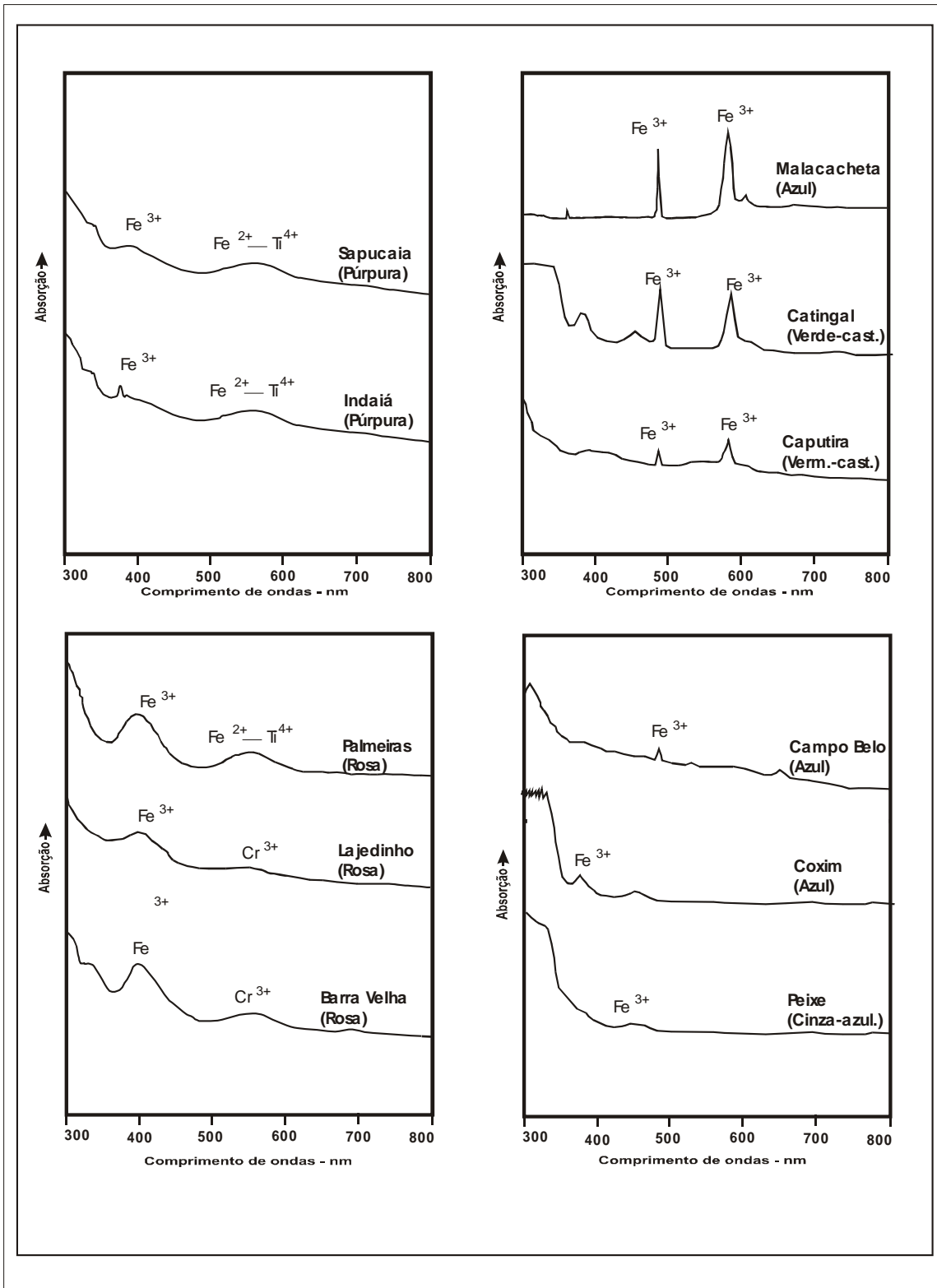


Figura 5.2 – Espectros em UV-Visível de amostras selecionadas de rubi e safiras das ocorrências estudadas.

5.1.4.3 MEV/EDS

Inclusões sólidas referem-se a diminutos cristais de natureza variada englobados pelo mineral durante sua cristalização. Sua identificação e caracterização química é de grande interesse, pois a paragênese encontrada e a relação cronológica entre os minerais individuais podem, em princípio, ser utilizadas para identificar a rocha fonte, os processos envolvendo a formação do hospedeiro e, em alguns casos, outros fenômenos a que o mineral foi submetido após sua cristalização. O coríndon normalmente contém um grande número de fases minerais sob a forma de inclusões cristalinas, as quais tornam-se fontes importantes de informações a respeito de seu processo gerador. As principais fases sólidas identificadas nas amostras analisadas estão relacionadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Inclusões sólidas identificadas por MEV/EDS.

Palmeiras	Rutilo em agulha e arredondado, apatita, ilmenita, hematita, monazita, mica
Sapucaia	Rutilo, diásporo (secundária), ilmenita e polimorfo de Al_2SiO_5
Indaiá	Rutilo, ilmenita, polimorfo de Al_2SiO_5 , monazita, espinélio
Caputira	Rutilo muito abundante e arredondado, zircão e diásporo (secundário)
Campo Belo	Não identificadas.
Malacacheta	Ilmenita, polimorfo de Al_2SiO_5
Coxim	Rutilo, ilmenita (raras)
Catingal	Zircão euédrico, monazita, hematita, mica
Lajedinho	Apatita, rutilo
Barra Velha	Biotita, monazita, rutilo, diásporo (secundário, em canais), clorita e pirita (secundárias)
Peixe	Zircão

Mineral comum como inclusão em coríndon, o rutilo costuma ser o principal responsável pelos diferentes graus de transparência desse mineral, além de proporcionar efeitos ópticos especiais em rubi e safiras (asterismo, efeito seda e *chatoyance*). A maior parte das amostras analisadas contém rutilo. Nas safiras de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Caputira essas inclusões tendem a se apresentar na forma de grãos arredondados, principalmente nessa última. Nas outras amostras estão na forma de agulhas muito finas e alongadas. Não foi encontrado rutilo em amostras de Campo Belo, Malacacheta, Catingal e Peixe. Ilmenita, outro mineral de Ti, ocorre em Palmeiras, Sapucaia, Indaiá, Malacacheta e Coxim.

Também comum em coríndon, o diásporo é uma das fases hidratadas de Al_2O_3 e, à semelhança do rutilo, costuma ocasionar perda de transparência em rubi e safiras por se apresentar normalmente preenchendo planos paralelos da geminação polissintética nessa gemas. Chodur (1997) mostrou ser o diásporo o causador dos efeitos ópticos especiais encontrados em rubis e safiras de Barra Velha, preenchendo canalículos paralelos entre si. Liccardo *et al.* (2000) encontraram diásporo e outras fases hidratadas de Al_2O_3 em grande parte do coríndon encontrado em Minas Gerais, utilizando-se de outras

técnicas de análise, como ATD, ATG e espectroscopia no infravermelho. Essas fases não são facilmente detectáveis em MEV/EDS devido ao pouco contraste com a matriz de coríndon.

Nas amostras de Indaiá, Sapucaia e Malacacheta foram encontradas inclusões de Al_2SiO_5 . A técnica do MEV/EDS fornece a composição química, mas não características estruturais do mineral, o que não permite distinguir qual dos polimorfos (cianita, sillimanita ou andaluzita) está presente. Entretanto, a presença de qualquer desses polimorfos aponta para importantes considerações genéticas, já que eles são minerais típicos de rochas metamórficas aluminosas.

Inclusões de espinélio foram detectadas nas safiras de Indaiá, o que associado à presença de um dos polimorfos de Al_2SiO_5 , fornece importantes informações sobre o grau metamórfico da rocha geradora e, por conseguinte sobre as condições de origem do próprio coríndon.

Zircão, em geral euédrico, é encontrado com frequência nas amostras de Catingal, Caputira, Indaiá, Peixe e Palmeiras. Monazita foi identificada somente nas amostras de Palmeiras, Indaiá, Catingal e Barra Velha. Possivelmente a presença desse mineral pode ter influenciado nos teores de elementos terras-raras nas análises químicas de INAA (Tabela 5.1).

Somente em Barra Velha foram identificadas inclusões de pirita e clorita que, em consonância com os estudos de Chodur (1997), podem ser utilizadas como fator diagnóstico de procedência em relação às outras amostras estudadas. Ambos minerais são relativamente abundantes nos rubis e safiras desse depósito.

Foram constatadas, ainda, inclusões de micas e hematita (ou magnetita) no coríndon de Catingal e Palmeiras. No caso de Catingal o mineral de ferro é muito abundante, o que exerce forte influência sobre os teores de Fe obtidos nas análises químicas. Mica também ocorre inclusive nos cristais de Indaiá e Sapucaia. Somente em Palmeiras e Lajedinho foi encontrada apatita inclusa em coríndon.

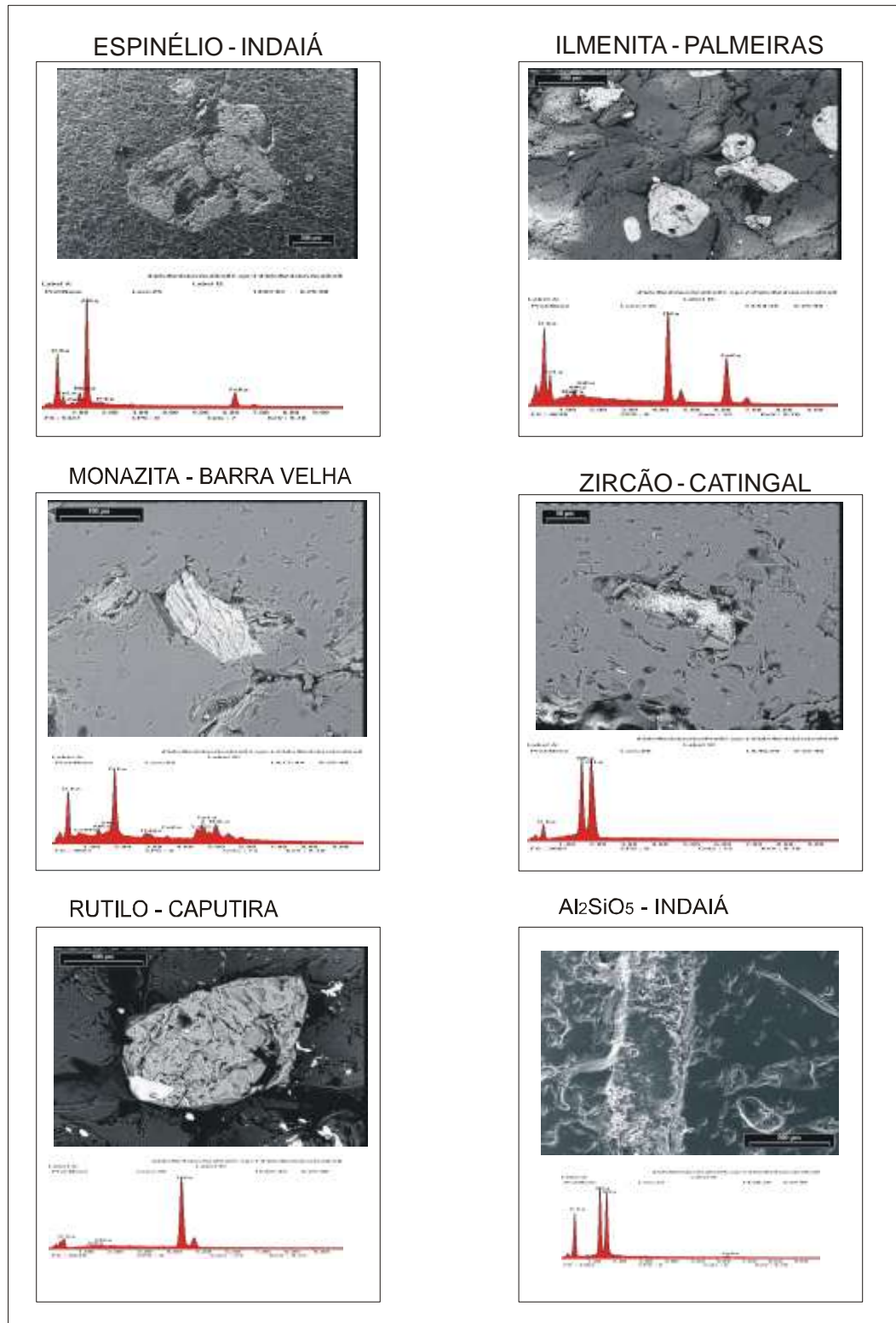


Figura 5.3 – Imagens de MEV/EDS de inclusões selecionadas do coríndon das ocorrências investigadas.

5.1.5 Discussão

A maior parte das ocorrências estudadas apresenta-se em depósitos secundários e a origem da mineralização não pode ser determinada devido à ausência de afloramentos das rochas portadoras do coríndon. O estudo de inclusões e elementos traços tem sido utilizado em ocorrências de outras partes do mundo na tentativa de se definir o tipo de processo que dá origem ao coríndon. A existência de duas ocorrências de coríndon em depósitos primários (Catingal e Peixe) se presta a comparativos entre esses depósitos e os outros, secundários.

Normalmente as possibilidades mais comuns para a geração do mineral coríndon envolvem processos metamórficos regionais (é o caso de Catingal) ou termais, magmatismo alcalino (é o caso de Peixe) e ainda, associado a álcali-basaltos na forma de xenólitos de origem mantélica. Esses processos genéticos podem determinar diferenças fundamentais no coríndon gerado, bem como nas suas inclusões e/ou na composição química.

O estudo das inclusões revelou a presença de polimorfos de Al_2SiO_5 nas ocorrências de Indaiá, Sapucaia e Malacacheta, o que aponta uma gênese relacionada a metamorfismo nessas localidades. Ainda em Indaiá, foram identificadas inclusões de espinélio, o que indica condições de metamorfismo de fácies granulito. Liccardo *et al.* (2003) sugerem para Palmeiras, Sapucaia, Caputira e Indaiá gênese metamórfica em fácies granulito, baseados em semelhanças petrogenéticas com o depósito de Catingal, onde o coríndon ocorre em paragneisse em paragênese com álcali-feldspato, plagioclásio, biotita e sillimanita. Outras inclusões identificadas podem fornecer assinaturas que permitem a distinção de proveniência, como em Barra Velha, onde a presença de clorita e pirita, como inclusões secundárias, é característica. Nesse depósito, Chodur (1997) e Chodur & Liccardo (2000) sugerem uma origem a partir de sedimentos pelíticos submetidos a metamorfismo de altas pressões e temperaturas, isto é, de fácies granulito, em função de estudos geológicos e de inclusões fluidas e sólidas.

A constatação da presença de certos elementos traços é muito significativa nas amostras investigadas. Os teores de elementos terras raras nas amostras de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Catingal, por exemplo, distinguem essas ocorrências das demais. Os teores de W encontrados em amostras de Caputira e Malacacheta sugerem uma possível influência de rochas graníticas no processo de formação do mineral. Em Malacacheta, Basílio (1999) sugere intensos processos de metassomatismo entre corpos graníticos e ultramáficas na gênese da alexandrita encontrada junto com coríndon em aluviões e colúvios.

Estudos de elementos-traços em coríndon de outros lugares do mundo (e.g. Sutherland *et al.* 1998 e 1999, Schwarz & Stern 2000, Sutherland & Schwarz 2001) correlacionam os teores de Cr, Ga, Fe e Ti e

definem campos relacionados aos diferentes modelos genéticos. Esses autores propõem campos bastante diferentes para coríndon de origem basáltica e de origem metamórfica (Figura 5.4). Sutherland & Schwarz (2001) reconhecem, no entanto, que as conclusões sobre as variações desses elementos-traços são mais consistentes em coríndon de campos basálticos. Raramente os dados obtidos em coríndon metamórfico indicam se o metamorfismo é regional em sedimentos pelíticos ou metassomático. Em geral o coríndon basáltico é rico em Fe e mostra fortes bandas de transferência de carga $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ no espectro de absorção UV-Visível. Poderia ser o caso de Coxim, mas essas bandas não ficaram evidentes. No diagrama da Figura 5.4, as safiras de Coxim caem no campo do modelo basáltico, o que sugere uma origem associada a álcali-basaltos conforme discutido por Liccardo & Addad (2002). Amostras do depósito de Peixe, associado a complexo alcalino, apresentaram resultados semelhantes a Coxim para essas correlações (Figura 5.4). Kitajima (2002) propõe uma origem ígnea para o coríndon de Peixe, com base, entre outras evidências, nos teores de Ga, descartando a possibilidade do coríndon ser xenocristal. Os valores obtidos para Cr, Ga, Fe e Ti nesse trabalho são compatíveis com os resultados de Kitajima (2002). As amostras de Malacacheta e Campo Belo mostram razões Cr/Ga baixas, o que poderia indicar semelhanças genéticas com o coríndon de origem escarnítica do Madagascar (Schwarz *et al.* 1996). As variações de Cr e Ga de cada ocorrência apresentam comportamento característico, como mostra o gráfico da Figura 5.5. Observa-se que o Ga oscila bem menos do que o Cr, em torno de 100ppm. Nas ocorrências interpretadas como de origem metamórfica de fácies granulito o Cr é sensivelmente mais alto (Palmeiras, Caputira, Indaiá, Lajedinho e Barra Velha) ou aproximadamente igual ao Ga (Sapucaia e Catingal), enquanto que em Campo Belo, Malacacheta, Coxim e Peixe o Cr é mais baixo.

Os principais elementos cromóforos em coríndon analisados foram plotados no diagrama ternário Ti-Cr-Fe/10 (Figura 5.6) e mostram, principalmente, proporções elevadas de Ti para Caputira e de Cr para as amostras avermelhadas de Barra Velha e Lajedinho. A forte presença de Fe fica evidenciada nas amostras de Catingal e Campo Belo.

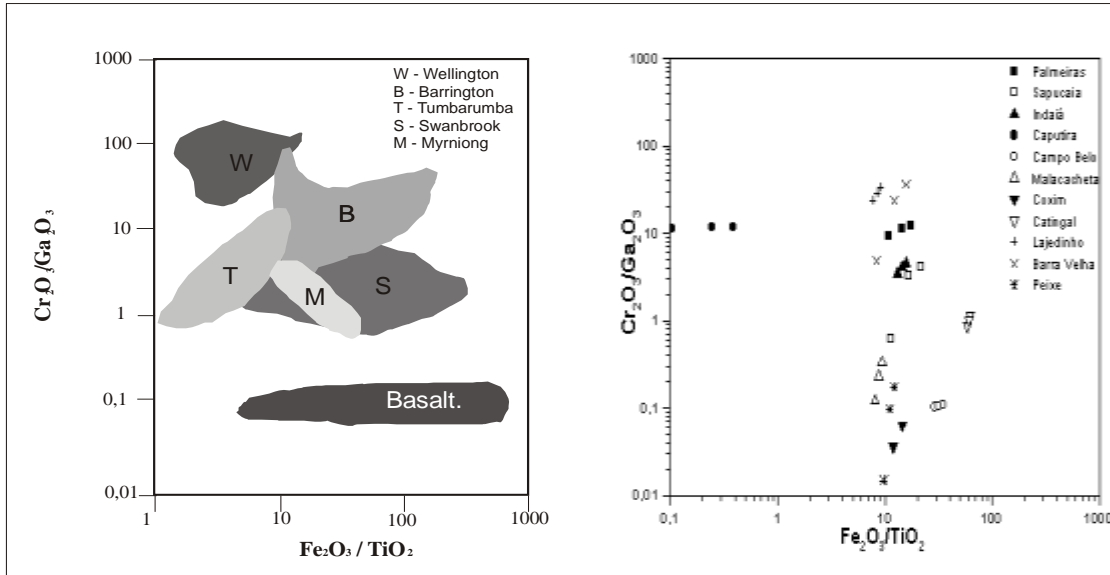


Figura 5.4 – Correlação Cr/Ga versus Fe/Ti em coríndon de ocorrências de origem metamórfica e basáltica da Austrália (Schwarz *et al.* 2000) e das amostras estudadas do Brasil.

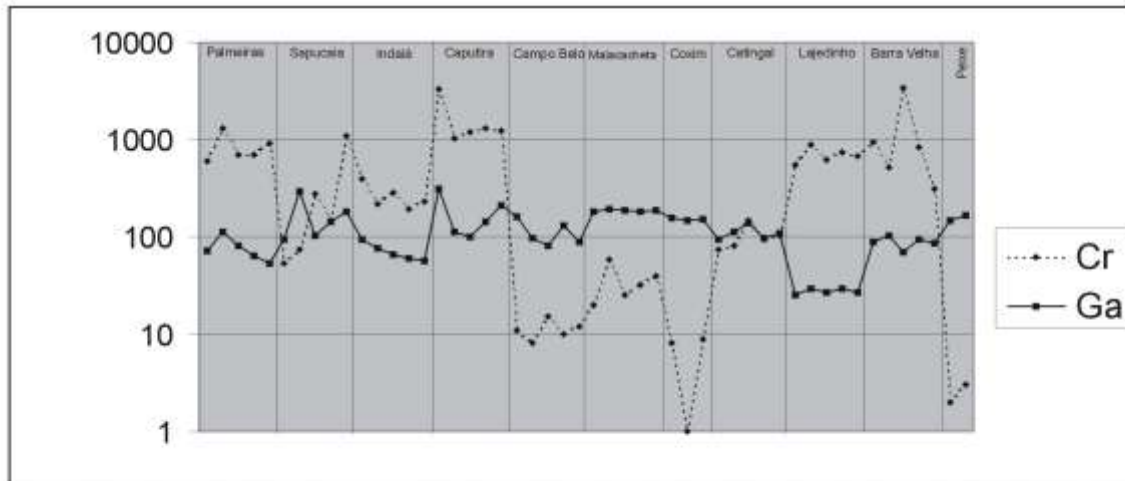


Figura 5.5 – Variação de Cr e Ga para as amostras analisadas de coríndon do Brasil (em ppm).

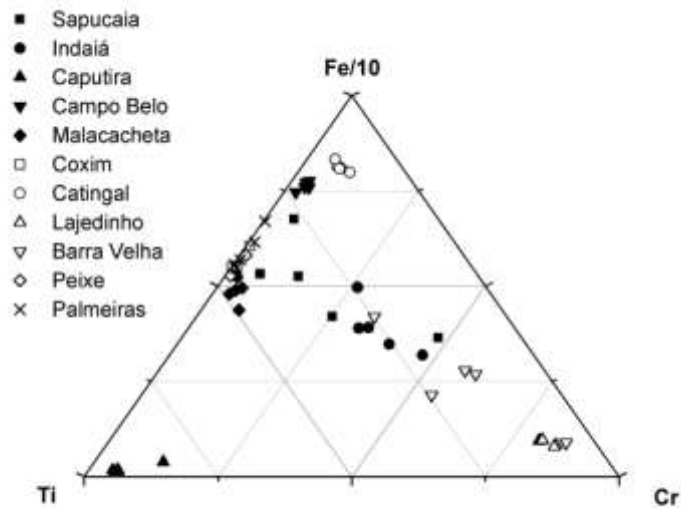


Figura 5.6 – Gráfico ternário mostrando as relações entre os principais elementos cromóforos do coríndon.

Os teores de Ti podem se apresentar excepcionalmente altos em algumas amostras, em função muitas vezes do excesso de inclusões de rutilo. É o caso de Caputira, onde foram verificadas inclusões abundantes de rutilo na forma de grãos arredondados e teores anômalos, da ordem de 21.000ppm de Ti (Tabela 5.2). A presença de inclusões não é descartada como fator de influência para certas anomalias químicas. Assim como o excesso de Ti nas amostras de Caputira, a presença de elementos terras raras em coríndon de Palmeiras, Sapucaia, Indaiá e Catingal pode ser justificada por inclusões de monazita, identificadas em MEV/EDS.

Os espectros UV-Visível mostram que na maior parte das amostras, os principais picos de absorção referem-se à presença de Fe^{3+} e Cr^{3+} . Na faixa de 370 a 420nm, as amostras de Barra Velha, Palmeiras, Lajedinho e Indaiá apresentaram forte absorção, o que pode ser atribuído aos teores mais altos em Cr verificados nessas amostras. No caso de Caputira, o espectro revela os altos teores tanto de Fe, quanto de Cr.

As bandas mais largas na faixa de 500 a 600nm costumam indicar o mecanismo de transferência de cargas entre Fe^{2+} e Ti^{4+} , causador da cor azul em safiras ou presença de Cr^{3+} , causador da cor vermelha. As amostras de Palmeiras e Indaiá (azuladas) e as de Barra Velha e Lajedinho (avermelhadas) mostraram claramente esse comportamento. Os picos semelhantes dos espectros de Malacacheta, Catingal e Caputira, em 485nm e 585nm poderiam ser atribuídos aos elevados teores de Fe dessas amostras.

O comportamento a partir de 650nm no espectro, em quase todas as amostras, revelou uma tendência de inflexão negativa, o que é característico para coríndon de origem “não-basáltica”, conforme Smith *et al.* (1995). Sutherland *et al.* (1998) corroboram esta idéia, acrescentando que as safiras de Madagascar (origem tipo escarnito – Schwarz *et al.*, 1996) são uma exceção. Em nenhum dos espectros (Figura 5.2) verifica-se esse *trend* e, à exceção de Coxim, observa-se inclusive a tendência a uma diminuição da absorção a partir de 650nm.

Os resultados da espectroscopia em UV-Visível para as amostras analisadas mostram a possibilidade de interação de mais de um mecanismo causador de cor, principalmente entre os cromóforos Fe e Cr, o que se reflete principalmente nas tonalidades impuras, como o castanho ou violeta (Figura 5.5).

5.1.6 Considerações Finais

As análises químicas para elementos-traços, associadas a outras técnicas de laboratório, como o estudo das inclusões e espectroscopia no UV-Visível, revelaram importantes informações sobre o coríndon dos depósitos brasileiros. Como não são primários, na maior parte das vezes esse tipo de investigação pode trazer indicativos sobre possíveis modelos genéticos ou servir como indicador de procedência.

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 aluminosos representam um importante papel na formação dos depósitos de coríndon desta região. Segundo estes autores, cinturões de granulitos metassedimentares produzidos por colisão de placas são ambientes geológicos propícios para a formação de coríndon-gema. Dahanayake *et al.* (1980) concluíram que as fontes dos depósitos sedimentares de coríndon no Sri Lanka são gnaisses granatíferos e escarnitos. A partir disso, Munasinghe & Dissanayake (1981) traçaram um comparativo entre estas litologias e os cinturões granulíticos metassedimentares do Brasil, descritos por Wernick & Almeida (1979), evidenciando similaridades na história geológica e no potencial para geração de coríndon.

Os resultados obtidos nas amostras de coríndon do Brasil comprovam que a grande maioria dos depósitos pode estar associada a uma gênese em terrenos granulíticos, de maneira muito semelhante ao modelo do Sri Lanka. Os depósitos de Peixe e Coxim, localizados fora do contexto granulítico, são exceção. Em Peixe, o coríndon ocorre encaixado em diorito-pegmatitos e biotita-nefelina sienitos, com modelo genético magmático. Em Coxim, no entanto, a origem do coríndon, encontrado em depósitos sedimentares recentes, pode estar associada a basaltos alcalinos, para onde apontam os resultados obtidos nesse estudo.

CAPÍTULO 6

GEMOLOGIA

6.1 RUBI E SAFIRAS DE MINAS GERAIS, BRASIL *

Antonio Liccardo; João Eduardo Addad, Nelson Luiz Chodur, Ester Figueiredo Oliveira & Hanna Jordt-Evangelista

6.1.1 Abstract

In this paper we discuss the results of gemmological, spectroscopic, and chemical study of ruby and sapphires from several occurrences in Minas Gerais, Brazil. Gemmological characterization in terms of color and inclusions indicate a good economic potential as gemstone for the studied corundum. The identification of inclusions of high-grade metamorphic minerals and the interpretation of the chemical composition in terms of trace elements point to a metamorphic origin for the corundum. The similar geology of the studied area and the region where the important ruby and sapphire deposits from Sri Lanka are found suggests that new deposits might be discovered in Minas Gerais.

6.1.2 Introdução

Nos últimos anos, novas ocorrências de coríndon surgiram em Minas Gerais (SE do Brasil), conhecido produtor de gemas coradas e diamante. Os depósitos de Palmeiras, Indaiá, Sapucaia e Malacacheta produzem safiras azuis, com tons violeta ou púrpura e rubi de tamanhos pequenos, mas com boa intensidade de cor e transparência. Indaiá é um depósito já conhecido (Epstein *et al.* 1994, Liccardo 1999) que teve sua produção interrompida em 1996 e que, esporadicamente, apresenta alguma produção por garimpeiros. Do mesmo modo que em Indaiá, Palmeiras e Sapucaia, descobertas recentes na mesma região, apresentam um bom potencial gemológico, com gemas de tonalidades variando do azul ao púrpura, às vezes com efeito alexandrita, eventualmente com presença de rubi. O depósito de Malacacheta, conhecido há várias décadas como produtor de alexandrita, sempre produziu safiras azuis como sub-produto nas minerações. Atualmente estão sendo comercializadas como material lapidável e sendo tratadas termicamente em Bangkok. Este artigo reporta características desses depósitos e suas gemas, assim como mais informações sobre as já conhecidas safiras de Indaiá.

6.1.3 Histórico

A presença de coríndon no Brasil tem sido mencionada há muito tempo em literatura (Hussak, 1916; Guimarães 1934), sem que existisse, no entanto, uma produção de material com qualidade-gema. A primeira menção de safiras azuis com qualidade para lapidação foi em Coxim, Mato Grosso do Sul (Eppler 1964). Nesses depósitos a safira é encontrada como mineral satélite em cascalhos produtores de diamante e nunca houve produção constante, sendo que algumas pedras são esporadicamente comercializadas.

Em Malacacheta, pequenos cristais de safira azul e incolor/leitosa foram retirados juntamente com crisoberilo e alexandrita durante anos, contudo com pouca produção comercial.

A descoberta dos depósitos de Indaiá no início da década de 90 foi a mais promissora até então, tendo sido descrita por Themelis (1994) como a primeira ocorrência comercial de coríndon no Brasil. Em 1999 iniciou-se uma pequena produção em Sapucaia, a cerca de 25km ao sul de Indaiá, com gemas muito semelhantes, inclusive com moderado efeito alexandrita (Liccardo & Jordt-Evangelista, 2000). Esse material foi descoberto por criadores de gado quando uma pedra azulada ficou presa ao casco de um animal que mancava por este motivo. Logo cristais na forma de barrilete começaram a ser vendidos como amostras de coleção no mercado de Ouro Preto.

Em 2000 surgiram notícias sobre o depósito de Palmeiras, a cerca de 60km a sudeste de Sapucaia, com algumas gemas semelhantes aos depósitos anteriores, mas com tons predominantemente mais avermelhados. As primeiras informações sobre essa ocorrência foram obtidas durante uma excursão do 31th *International Geological Congress*, em visita de um dos autores (A.L.) aos comerciantes de Governador Valadares. A falta de tradição na exploração de rubi e safira, em meio a tantas outras gemas no estado de Minas Gerais, faz com que os garimpeiros que atuam nos pegmatitos da região concentrem-se na extração de outras gemas, principalmente água-marinha e, em Malacacheta, alexandrita e crisoberilo.

6.1.4 Localização e Acessos

Três dessas ocorrências situam-se no eixo Manhuaçu-Caratinga, a cerca de 250km a leste de Belo Horizonte (Figura 6.1). A ocorrência de Indaiá pertence ao município de Vargem Alegre, aproximadamente a 20km a noroeste de Caratinga, a montante do Córrego São Gabriel. No município de Sapucaia, a cerca de 25km a sudoeste de Caratinga, nas cabeceiras do córrego Ferrugem encontra-se a segunda ocorrência. O depósito de Palmeiras situa-se no município de Manhuaçu, no distrito de mesmo

nome, a cerca de 12km a noroeste da cidade. Nessas ocorrências o acesso em parte é feito por estradas de terra que na estação das chuvas (setembro a janeiro) tornam-se dificilmente transitáveis.

Os depósitos de Malacacheta situam-se às margens do Córrego do Fogo e Ribeirão Soturno, a cerca de 12km a norte da cidade de Malacacheta. O acesso a essa região é um pouco melhor que os das anteriores, mesmo na estação de chuvas. Malacacheta está a cerca de 270km da região de Indaiá, Palmeiras e Sapucaia.

6.1.5 Contexto Geológico Regional

O coríndon da região de Manhauçu-Caratinga se encontra em depósitos secundários sobre terrenos gnáissicos-migmatíticos, com presença eventual de litotipos granulíticos e charnoquíticos, além de inúmeros corpos pegmatíticos que entrecortam todas as rochas. Os terrenos fazem parte do núcleo do Orógeno neoproterozóico Araçuaí (Pedrosa-Soares e Wiedemann-Leonardos, 2000).

Em Malacacheta, os depósitos também são colúvio-aluvionares encaixados em rochas metamórficas pré-cambrianas. Regionalmente o contexto geológico mostra a existência de um batólito granítico intrudido em xistos peraluminosos das Formações Salinas e Capelinha e rochas metaultramáficas que cortam os xistos da Formação Capelinha. O corpo granítico, sem indícios de metamorfismo, foi datado em 537 ± 8 Ma (Basílio 1999) e as rochas encaixantes são de idade proterozóica.



Figura 6.1 – Localização das ocorrências de coríndon estudadas.

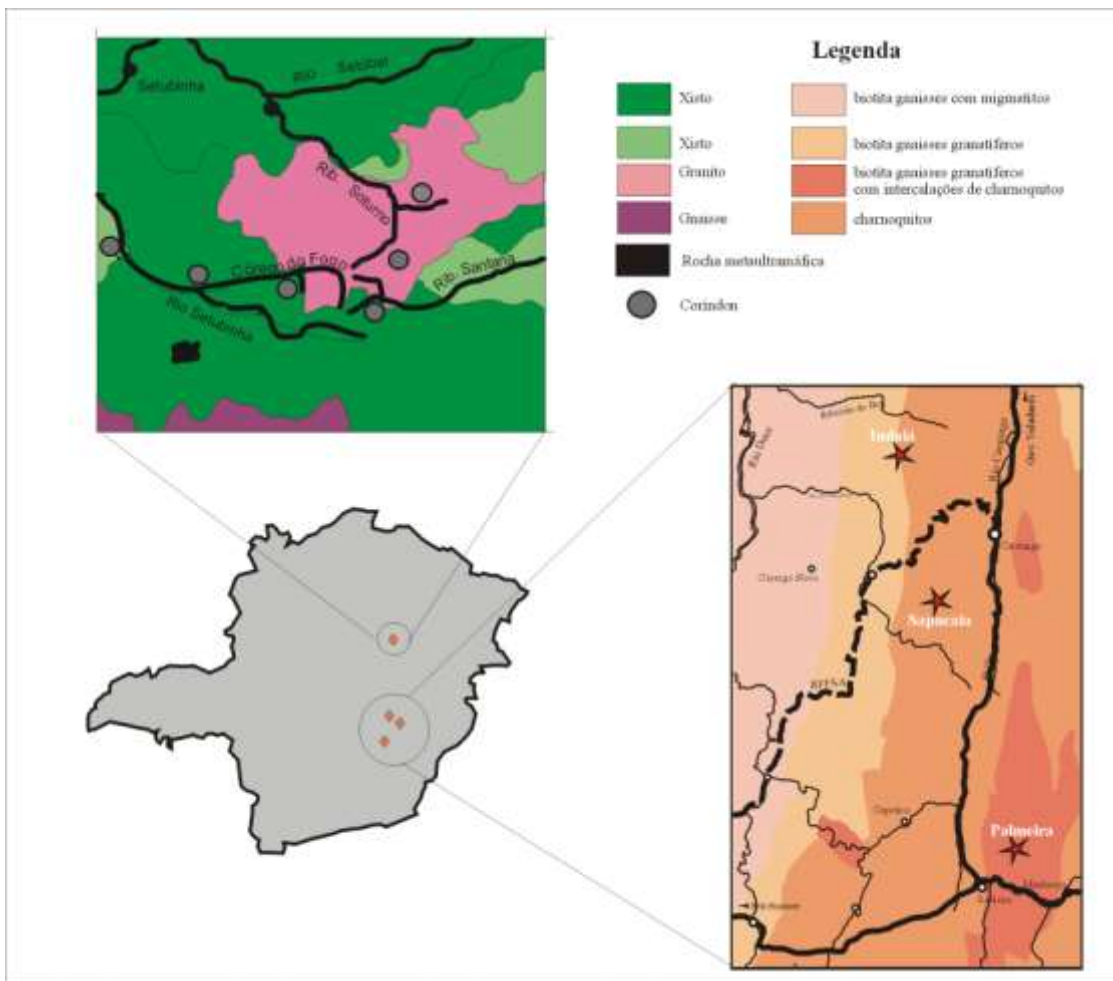


Figura 6.2 – Esboço geológico das áreas de ocorrência de coríndon no eixo Manhuaçu-Caratinga e em Malacacheta.

6.1.5 Características dos Depósitos

Na faixa que compreende os depósitos de coríndon, ocorrem litologias pertencentes a terrenos metamórficos de médio até alto grau, como xistos, gnaisses, granulitos e charnoquitos. Esses terrenos são cortados por corpos pegmatíticos pouco diferenciados, por vezes mineralizados em água-marinha. O coríndon é sempre encontrado em depósitos sedimentares recentes, sem indícios da possível rocha que o originou.

Os depósitos podem abranger cinco tipos gerais: aluviões recentes, paleoaluviões de terraço suspenso, paleoaluviões de fundo de vale, colúvios e elúvios. A grande maioria dos depósitos de coríndon está associada a paleoaluviões plio-pleistocênicos, formados sob condições de fluxos torrenciais e retrabalhamento (Addad, 2001). 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. A alta densidade do coríndon faz com que esteja associado a pesados blocos de quartzo e fragmentos de encaixantes, nas porções mais inferiores.

Neste contexto secundário, o retrabalhamento sedimentar fragmenta e “seleciona” os clastos e os concentra em níveis e pláceres. 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 fragmentos com menor quantidade de defeitos de cristalização, de fraturas e inclusões, que correspondem a partes com maior resistência mecânica a impactos e abrasão. Isto 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.

6.1.6 Métodos de Extração

Os depósitos de coríndon, usualmente inconsolidados, mostram uma relativa facilidade mecânica de exploração. Camadas de sedimentos cobrem os níveis mineralizados, geralmente cascalheiras aluvionares ou porções grosseiras de colúvios. O descapamento 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. As gemas podem então ser separadas por processos que envolvem classificação granulométrica, lavagem e concentração-catação.

Em Indaiá, após o *rush* da extração em meados de 90 (Epstein *et al.* 1994) os garimpos paralisaram os trabalhos e hoje a extração é realizada individualmente nos leitos dos rios. O mesmo acontece em Sapucaia, que ao final da década era trabalhada com tratores e calhas para a concentração do material. Na área de Palmeiras somente garimpos em aluvião estão produzindo, apesar de tentativas de mecanização. A extração organizada tem esbarrado em problemas ambientais e por isso está paralisada.

Em Malacacheta as áreas de extração (cerca de 4x4m) são escoradas com madeira para contenção de terra e a água é bombeada continuamente com motores movidos a diesel ou gás. Equipes de até cinco pessoas trabalham em cada área, retirando o material mineralizado e buscando principalmente a alexandrita, que ocorre associada.

6.1.7 Amostras e Análises

Amostras de coríndon, juntamente com seus minerais satélites, foram coletadas com lavagem de cascalho e peneiramento. A quantidade de material em bruto permitiu análises destrutivas e algumas amostras coletadas puderam inclusive ser lapidadas. Em Palmeiras foram obtidas 16 gemas facetadas e 18 cabochões; em Sapucaia 6 facetadas e 4 cabochões; em Malacacheta 4 facetadas e em Indaiá 5 facetadas .

As amostras das quatro ocorrências foram submetidas a análises gemológicas tradicionais e ainda, cinco exemplares de cada depósito foram moídos para análises químicas por INAA (Análise por Ativação Neutrônica Instrumental) e uma por ICP-OES (Plasma Indutivamente Acoplado com Espectrometria de Emissão Óptica), para complementação de alguns elementos. Além disso foram realizadas análises em espectroscopia UV-Visível, ATD/ATG (Análises Termodiferencial e Termogravimétrica) e MEV/EDS (Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectrometria de Energia Dispersa). As amostras submetidas à espectroscopia foram preparadas em secções cortadas perpendicularmente ao eixo *c* dos cristais. Os testes termodiferencial e termogravimétrico realizados em um mineral anidro (coríndon) resultam na identificação de fases hidratadas associadas a esse mineral, como a bohemita e o diásporo.

6.1.8 Características e Resultados

6.1.8.1 Malacacheta

A safira de Malacacheta ocorre em cristais euédricos transparentes, no formato típico de barrilete e tamanho normalmente pequeno (<1cm). A maior parte apresenta um marcante zonamento de cor, sendo incolor com um núcleo ou mancha de coloração azul intenso, boa transparência, tendendo a 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 extraordinário e 1,767 a 1,770 para o raio ordinário. A birrefringência média é de 0,009 (Tabela 6.1). Sob luz UV essas safiras mostram resposta moderada a fraca, de tons avermelhados para todas as amostras azuis, tanto em SW como em LW. Uma amostra incolor a levemente rosada apresentou reação muito forte ao UV de ondas longas (LW).

As inclusões sólidas identificadas em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura foram ilmenita, ilmenita magnésiana e um polimorfo de Al_2SiO_5 . O comportamento na análise termogravimétrica indica ausência de diásporo ou boehmita, comumente presentes em coríndon e causadores de perda de transparência.

As análises químicas resultaram, para as amostras de Malacacheta, na seguinte composição em elementos menores e traços: Cr 20 a 58ppm, Fe 3582 a 4415ppm; Ga 180 a 192ppm; Ti 392ppm; Na 69-90ppm; Mn 13ppm; La 0 a 3ppm e V 18ppm (Tabela 6.2 - para o Ti, Mn e V somente uma análise). 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 material produzido em Malacacheta. Os espectros UV-Visível mostraram picos intensos nas regiões de 485 e 585nm possivelmente associados a presença de Fe^{3+} (Figura 6.3).

6.1.8.2 Indaiá

Safiras de colorações que variam de azul profundo ao violeta, quase púrpura, são encontradas em depósitos coluvionares e aluvionares de Indaiá. Os cristais apresentam-se anédricos, geralmente de tamanho pequeno (< 1cm) e alguns mostram um moderado efeito alexandrita de azul para azul-púrpura e de púrpura para púrpura-violeta.

As análises gemológicas mostraram um pleocroísmo forte de azul para azul-violeta e de azul claro para púrpura. Os índices de refração variam de 1,760 a 1762 para o raio extraordinário e 1,770 para o raio ordinário, com birrefringência variando de 0,008 a 0,010. Sob luz UV de ondas longas (LW) as amostras apresentam fluorescência variável de moderada a forte com coloração avermelhada (Tabela 6.1).

As inclusões são constituídas de rutilo, ilmenita, zircão, moscovita, monazita, espinélio, biotita e um dos polimorfos de Al_2SiO_5 .

Análises químicas e espectroscópicas mostraram a presença de Fe, Ti e Cr como prováveis elementos causadores de cor nessas safiras. O efeito de mudança de cor (efeito alexandrita) e a forte fluorescência são associados à presença do íon Cr^{3+} . Os elementos menores e traços quantificados foram: Cr 191 a 390ppm, Fe 2626 a 3615ppm; Ga 60 a 93ppm; Ti 185ppm; Na 57-78ppm; Mn 13 ppm; La 19 a 81ppm; Ce 66 a 159ppm e V 44ppm (Tabela 6.2 – para o Ti, Mn e V somente uma análise).

Em termos de cor e transparência as safiras mostram um bom potencial para aproveitamento gemológico, o qual pode ser sensivelmente aumentado com tratamento térmico adequado. Themelis (1994) sugere que 80% do material produzido nessa localidade se prestaria ao tratamento por aquecimento, com base em testes que realizou em atmosfera oxidante e temperatura em torno de 1750°C.

Os espectros referentes às amostras de Indaiá são muito semelhantes aos obtidos em Palmeiras e Sapucaia, mostrando uma banda de absorção entre 370 e 420nm, que em safiras azuis do Sri Lanka, Mianmar, Vietnam e outras (Smith *et al.*, 1995), é associada à presença de Fe^{3+} . A faixa entre 500 e 600nm, região indicativa do mecanismo $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ e da presença de Cr^{3+} , apresenta-se na forma de bandas largas e suaves (Figura 6.3)

6.1.8.3 Sapucaia

A safira de Sapucaia ocorre em cristais euédricos, subédricos e fragmentos irregulares, nas cores azul, púrpura, violeta e preta. Apresenta-se em prismas hexagonais alongados e, muitas vezes, terminados em bipirâmide, sendo a superfície externa dos cristais normalmente lisa e freqüentemente recoberta por moscovita microcristalina. A maior parte dos cristais mostra dimensões em torno de 1cm, variando desde alguns milímetros até 8cm de comprimento (o maior exemplar encontrado).

Os cristais exibem pronunciada partição basal e romboédrica nos planos de geminação polissintética. Em termos de diafanidade, 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, ocorre ainda o asterismo com a formação de estrela de seis pontas.

As análises gemológicas mostraram pleocroísmo moderado a acentuado nas amostras azuis, púrpura e violeta. Os índices de refração variam de 1,759-1,762 para o raio extraordinário e 1,768-1,770 para o raio ordinário, com birrefringência média de 0,009 (Tabela 6.1). Sob iluminação ultravioleta de ondas curtas (SW), as safiras mostraram uma reação fraca a moderada (violeta); em ondas longas as amostras nas cores violeta e púrpura apresentaram reação de fluorescência muito forte (vermelha) e nas outras cores, reação moderada (violeta).

As principais inclusões identificadas foram rutilo, ilmenita e um polimorfo de Al_2SiO_5 , além da constatação de diásporo nos planos de geminação polissintética, muito semelhante ao material de Indaiá. As análises químicas mostraram os seguintes teores dos elementos menores e traços: Cr 54 a 1092ppm, Fe 4603 a 9312ppm; Ga 94 a 293ppm; Ti 361ppm; Na 58 a 169ppm; Mn 18 ppm; La 3 a 206ppm; Ce 21 a 300ppm e V 62ppm (Tabela 6.2 - para o Ti, Mn e V somente uma análise)

Os estudos dessas safiras apontam boas possibilidades de aproveitamento gemológico, à semelhança da safira de Indaiá, principalmente em relação às de cor azul e violeta e com efeitos ópticos especiais. Possivelmente, esse aproveitamento poderá ser aumentado se essas safiras forem tratadas termicamente. Os Espectros UV-Visível são semelhantes a Indaiá, com banda de absorção mais abrupta em torno de 370nm e uma banda suave entre 520 e 580nm, provavelmente relacionadas ao mecanismo de cor $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ (Figura 6.3).

6.1.8.4 Palmeiras

Os cristais encontrados em Palmeiras são euédricos, de coloração predominantemente avermelhada (rubí ou safira rosa), em menor escala também violeta ou púrpura e, raramente azul, com hábito prismático alongado e em “barrilete”, com tamanho variando de 0,5 a 4cm. Alguns exemplares pequenos também mostraram o efeito alexandrita, semelhante a Indaiá e Sapucaia, mas o efeito óptico especial que predomina nessas amostras é o efeito seda e, esporadicamente, alguns rubis apresentam discreto asterismo. Uma parte dos cristais apresenta-se transparente, porém a maioria varia de opaca a translúcida.

Amostras de coloração vermelha e rosa apresentam pleocroísmo moderado para tons mais escuros e os cristais azuis e violeta possuem pleocroísmo fraco. Os índices de refração variam de 1,761 a 1,763

para o raio extraordinário e 1,769 a 1,771 para o raio ordinário. A variação da birrefringência é de 0,008 a 0,010. Sob luz ultravioleta de ondas curtas (SW) a reação foi muito fraca e, em ondas longas (LW), as amostras de cores vermelha e rosa mostraram fluorescência muito forte (Tabela 6.1)

Como inclusões sólidas ocorrem zircão, rutilo (arredondado e acicular), apatita, ilmenita, hematita, monazita e mica. Também nessas amostras o diásporo encontra-se nos planos de geminação polissintética.

Os teores dos elementos menores e traços são: Cr 596 a 1293ppm, Fe 2022 a 3733ppm; Ga 71 a 114ppm; Ti 172ppm; Na 63 a 73ppm; Mn 9 ppm; La 16 a 150ppm; Ce 98 a 368ppm e V 57ppm (Tabela 6.2). A espectroscopia UV-Visível mostrou resultados muito semelhantes a Indaiá e Sapucaia, com banda de absorção de 370nm a 420nm e uma banda suave entre 520 e 580nm, provavelmente relacionadas à presença de Fe^{2+} - Ti^{4+} nas amostras azuladas e Cr^{+3} nas amostras rosadas ou avermelhadas (Figura 6.3).

Tabela 6.1 –Características gemológicas do coríndon das ocorrências estudadas.

Propriedades	Malacacheta	Palmeiras	Indaiá	Sapucaia
Cor (*100)	Azul claro, azul médio, bicolor, incolor	Vermelho, violeta, rosa, azul	Azul, púrpura, violeta	Azul, violeta, preta
Transparência (100)	Boa a translúcida	Boa a opaca	Boa a opaca	Boa a opaca. Safira preta sempre opaca
Efeitos ópticos (30)	Não	Efeito Alexandrita, seda e asterismo	Efeito alexandrita	Ef. Alexandrita, seda e asterismo (safira preta)
Índice refração (10)	1,759 – 1,764 (n _E) 1,767 – 1,770 (n _ω)	1,761 – 1,763 (n _E) 1,769 – 1,771 (n _ω)	1,760 – 1,762 (n _E) 1,770 – 1,770 (n _ω)	1,759 – 1,762 (n _E) 1,768 – 1,770 (n _ω)
Birrefringência (10)	0,009	0,008 – 0,010	0,009 – 0,010	0,009
Peso específico (10)	3,99 – 4,01	4,00 – 4,03	4,02 – 4,07	4,00 – 4,08
Pleocroísmo (10)	Moderado Azul escuro/claro	Moderado a fraco Verm/rosa – Viol/pur	Moderado a Forte Az/viol – Az/pur	Moderado a forte Az/vio – Viol esc/cla
Fluorescência (10)	SW – Fraca a mod. LW – Fraca a mod. Muito forte averm. para amostra incolor a levemente rosa.	SW – Fraca LW – Muito Forte Em tons vermelhos	SW – Mod. LW – Mod. Em tons vermelhos	SW – Fraca a mod.(violeta) LW – Mod. a forte (violeta e púrpura)
UV-visível (3)	Picos em 485nm e 585nm	Bandas entre 370-420nm e 520-580nm	Bandas entre 370-420nm e 500-600nm	Pico em 370nm e banda em 520-580nm
Características internas (30)	Zonamento de cor acentuado e aspecto leitoso	Geminação polissintética e fraturas	Zonamento de cor e fraturamento muito intenso	Zonamento de cor, fraturas e presença de diásporo
Inclusões (10)	Ilmenita, ilmenita magnésiana, polimorfo de Al ₂ SiO ₅	Zircão, rutilo, apatita, ilmenita, hematita, monazita e mica	Rutilo, ilmenita, zircão, moscovita, monazita, espinélio, biotita e polimorfo de Al ₂ SiO ₅	Rutilo, ilmenita e polimorfo de Al ₂ SiO ₅

(*) N^o de amostras para cada ocorrência**Tabela 6.2** – Teores de elementos menores e traços em coríndon de Minas Gerais, analisados por INAA e ICP-OES* (em ppm).

	Cr	Fe	Ga	Na	Ce	La	*Ti	*Mn	*V
Malacacheta	20-58	3582-4415	180-192	69-90	0	0-3	392	13	18
Palmeiras	596-1293	2022-3733	71-114	63-73	98-368	16-150	172	9	57
Sapucaia	54-1092	4603-9312	94-293	58-169	21-300	3-206	361	18	62
Indaiá	191-390	2626-3615	60-93	57-78	66-159	19-81	185	13	44

Figura – Espectros UV-Visível representativos dos depósitos

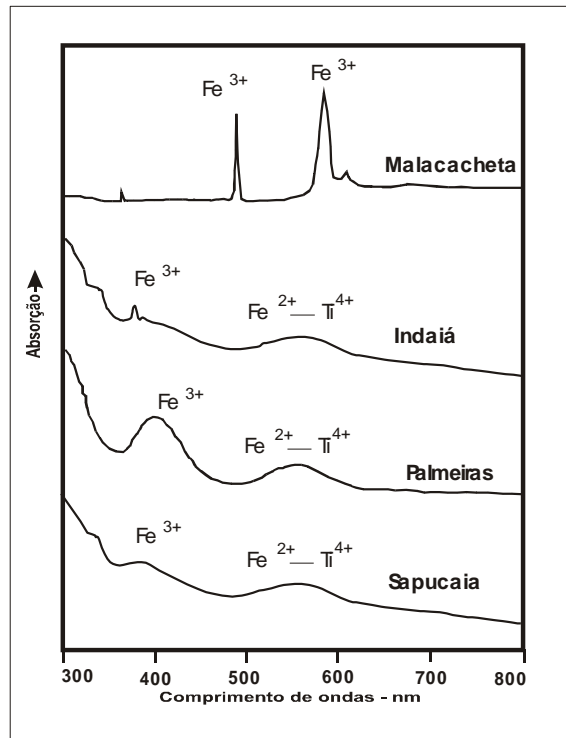


Figura 6.3 – Espectros de absorção no UV-Visível representativos para o coríndon das ocorrências estudadas.

6.1.9 Discussão

A descoberta de diversas ocorrências de coríndon com qualidade gemológica em áreas relativamente próximas é um forte indicativo do potencial para a existência de outros depósitos e de aumento da produção de rubi e safiras no Brasil.

As análises químicas apontam as causas de cor azul como sendo o mecanismo de transferência de cargas entre Fe²⁺ e Ti⁴⁺ e a presença de Cr³⁺ possivelmente influencia nas tonalidades violeta e púrpura, assim como pode estar associada ao efeito alexandrita e a forte fluorescência de algumas amostras, principalmente em Palmeiras e Indaiá. Nas amostras de coloração vermelha e com tonalidades rosa os teores de Cr são sensivelmente mais altos, podendo ser vinculados como causa dessas cores. Os espectros em UV-Visível são coerentes com essas possibilidades.

A ausência de Ce e La e o teor relativamente mais alto de Ga distinguem o coríndon de Malacacheta do coríndon da região de Manhauçu-Caratinga, o que pode sugerir diferenças genéticas bem como ser utilizado como indicador de proveniência.

Indícios de campo, como as rochas predominantes nas regiões, sugerem que a gênese do coríndon pode ser associada a processos metamórficos regionais, o que expande as possibilidades de existirem novas ocorrências em todo o leste de Minas Gerais, cujo contexto geológico é muito semelhante.

Os resultados analíticos e as características físicas descritas indicam que a aplicação de tratamento térmico adequado no coríndon estudado pode vir a melhorar significativamente a qualidade das gemas produzidas e viabilizar uma produção sistemática. Malacacheta, por apresentar produção constante, e Indaiá, pela qualidade de suas safiras, são as ocorrências com melhores possibilidades para a sistematização da extração.

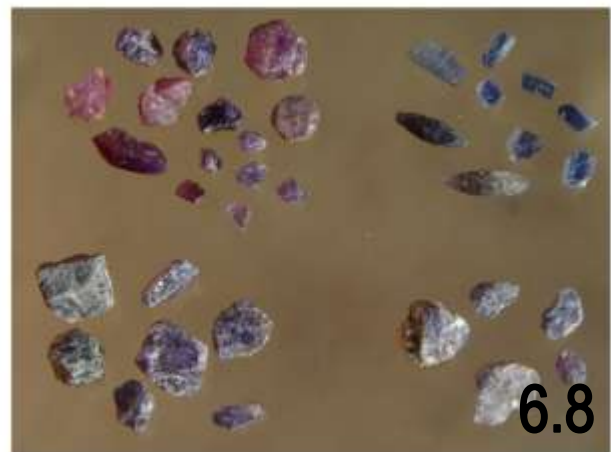


Fotografia 6.1 – Vista do relevo acentuado e vales encaixados da região de Palmeiras, Minas Gerais, onde encontram-se os depósitos de rubi e safiras.

Fotografia 6.2 – Exemplos de coríndon com restos da rocha matriz. O fragmento maior é de Sapucaia; no sentido horário Catingal, Caputira e Indaiá.

Fotografia 6.3 – Sistema de garimpagem implantado em Malacacheta, com bombeamento e drenagem dos córregos e escoramento das catas.

Fotografia 6.4 – Vista do garimpo de Sapucaia, com característico relevo da região.

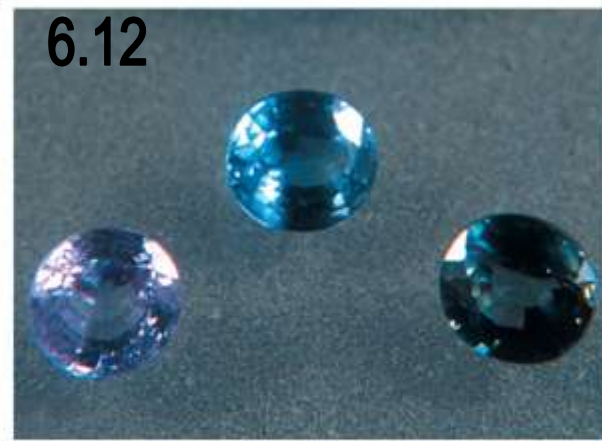
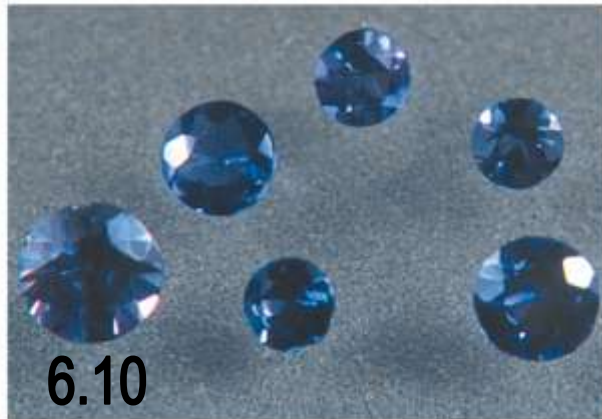


Fotografia 6.5 – Exemplos de safiras provenientes de Malacaheta. A coloração esbranquiçada e leitosa à esquerda apresenta o típico aspecto das safiras *geuda*, do Sri Lanka, que com tratamento térmico passa para os tons azuis à direita. Alguns fragmentos apresentam ambas colorações no mesmo cristal. Dimensões em torno de 1cm.

Fotografia 6.6 – Exemplos característicos das ocorrências de Sapucaia, Indaiá (em cima) , Palmeiras (rubi abaixo) e Malacacheta (safira em forma típica de barrilete). Os barriletes medem 1cm.

Fotografia 6.7 – Entre o material retirado de Sapucaia, algumas safiras negras apresentam zonamento de cor radial, que lembra algumas safiras chamadas *trapiche*, recentemente descobertas na Tailândia. Esses exemplares medem cerca de 2cm.

Fotografia 6.8 – Variação de cores e hábitos do material produzido em Palmeiras (acima esquerda), Malacacheta (acima direita), Sapucaia (abaixo esquerda) e Indaiá (abaixo direita). Exemplos maiores medem cerca de 1cm.



Fotografia 6.9 – Exemplares de rubi de Palmeiras. A gema em lapidação oval pesa 1,3 quilates.

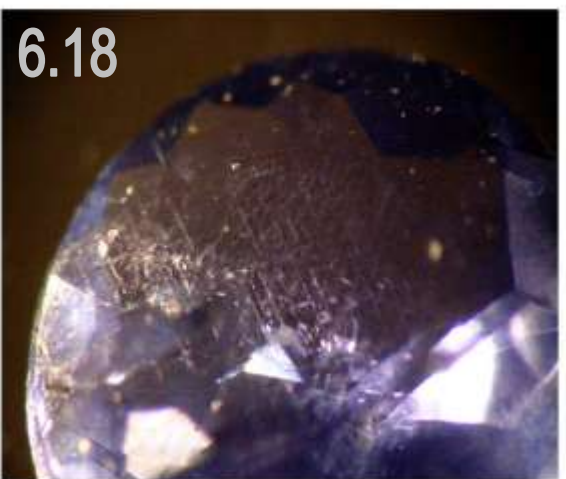
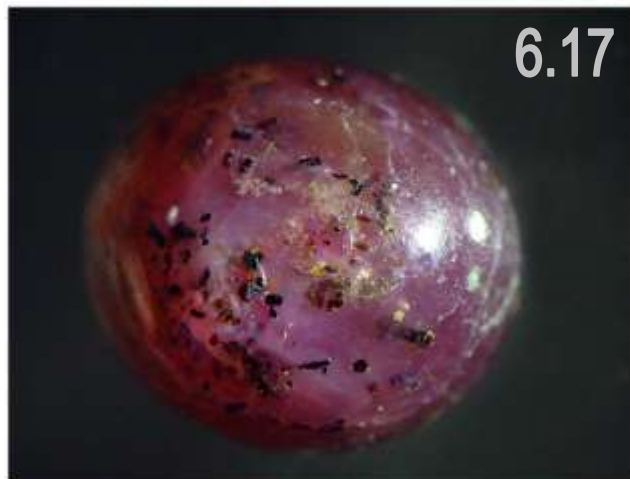
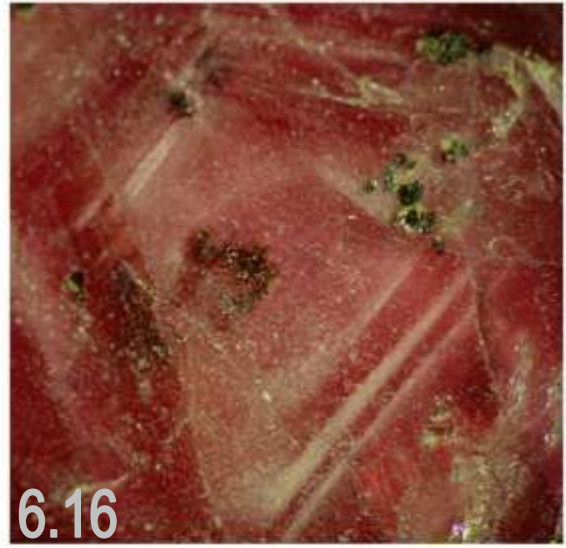
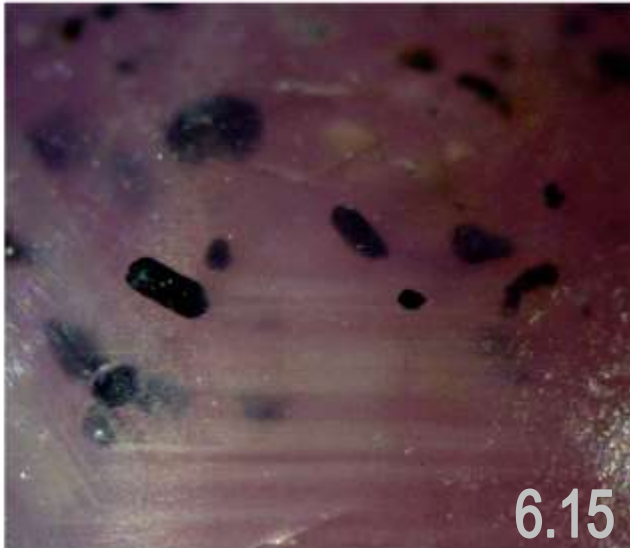
Fotografia 6.10 – Amostras lapidadas de safira azul de Sapucaia. A gema maior pesa 0,3 quilates.

Fotografia 6.11 – Anel em prata com safira azul proveniente de Indaiá (0,8ct).

Fotografia 6.12– Amostras de safira azul provenientes de Malacacheta, pesando entre 0,5 e 0,7 quilates.

Fotografia 6.13 – Cristais euédricos de safira bicolor de Malacacheta. A gema lapidada é aproveitada da parte azul dos cristais. Os barriletes medem em torno de 1cm.

Fotografia 6.14 – Variação de cores do material obtido em Palmeiras. O cristal maior mede 1cm.

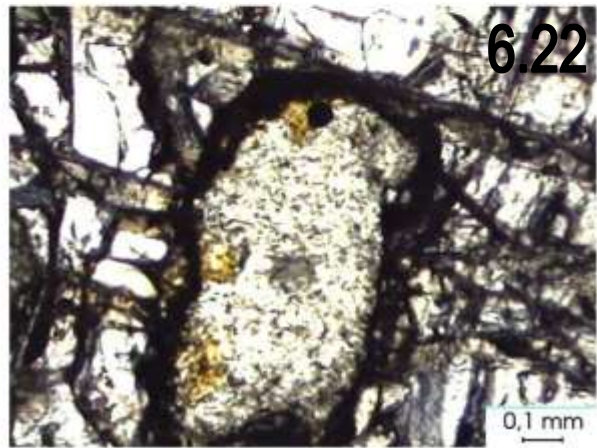
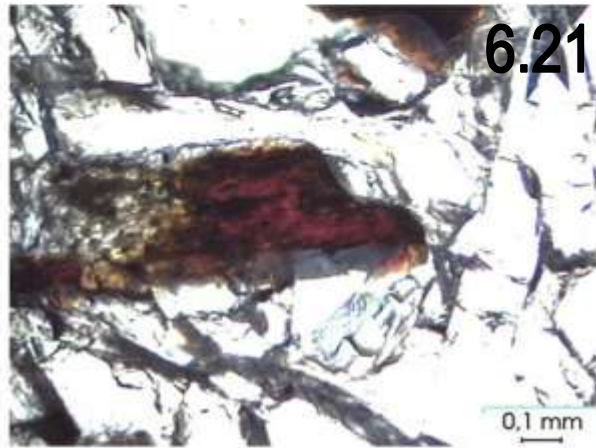
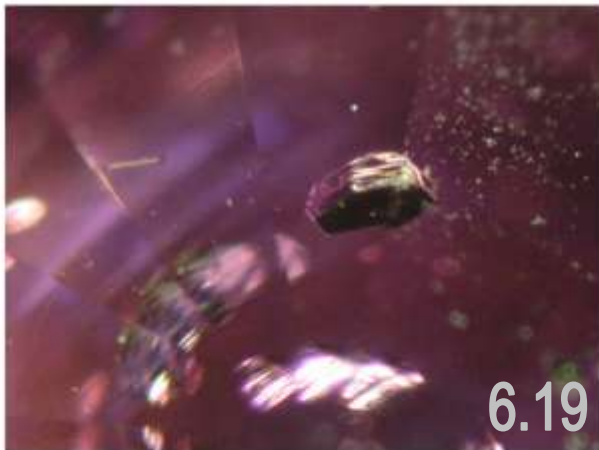


Fotografia 6.15 – Inclusões de ilmenita e zonamento de cor em safira violeta de Palmeiras. Aumento 10x.

Fotografia 6.16 – Zonamento de cor característico e mica em rubi de Palmeiras. Aumento de 10x.

Fotografia 6.17 – Cabochão de safira rosa de Palmeiras com inclusões de ilmenita, rutilo e mica. Largura 7mm.

Fotografia 6.18 – Cristais aciculares de rutilo inclusos em safira azul de Sapucaia. Aumento 10x



Fotografia 6.19 – Inclusão cristalina em safira rosa proveniente de Palmeiras, possivelmente agregado de mica.
Aumento 15x.

Fotografia 6.20 – Inclusão de mica castanha em safira azul proveniente de Sapucaia. Aumento 15x.

Fotografia 6.21 – Inclusão de lamela de biotita em safira azul de Indaiá.

Fotografia 6.22– Inclusão sólida em forma de grão arredondado, possivelmente monazita, em safira de Indaiá.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem realizada sobre as várias ocorrências de coríndon permite as seguintes considerações sobre esse mineral no Brasil:

- Atualmente são conhecidas 29 ocorrências de coríndon esparsas pelo território brasileiro. Minas Gerais e Bahia são os estados que apresentam maior número delas e conseqüentemente melhores possibilidades de produção sistemática de rubi e safiras.

- Os estudos comparativos mostraram semelhanças químicas, mineralógicas e genéticas entre os depósitos de Minas Gerais, da Bahia e de Santa Catarina (metamórficos). As ocorrências de Tocantins e Mato Grosso do Sul pertencem a contextos geológicos diferentes, possivelmente associados a processos magmáticos.

- A maior parte dos depósitos secundários está associada a paleoaluviões e paleocolúvios com características semelhantes, que indicam formação sob condições de fluxo intenso e deposição dos clastos de coríndon em armadilhas de relevo, em associação com blocos maiores de quartzo ou fragmentos de rocha. A provável proveniência do coríndon são bolsões ou camadas de rochas de alto grau, semelhantes às encontradas como encaixantes dos depósitos, porém mais pobres em sílica e, portanto, sem quartzo, que foram totalmente intemperizadas e erodidas. O entendimento da origem do coríndon e do sistema deposicional que gerou os depósitos permite o estabelecimento de controles na prospecção desse mineral-gema. Apesar do caráter localizado dos bolsões ou camadas, a possibilidade de existência de outros depósitos com características semelhantes se estende por uma ampla área de ocorrência, principalmente na faixa Caratinga-Manhuaçu.

- O conjunto de dados obtidos apontou uma gênese metamórfica para os depósitos da Bahia. Além de Catingal, com o coríndon encaixado em rocha inalterada, para outras ocorrências a identificação das inclusões e o estudo de minerais associados em sedimentos aluvio-coluvionares mostraram-se importantes ferramentas para possíveis correlações paragenéticas. É o que foi verificado no caso da relação coríndon/sillimanita nos sedimentos de Paraguaçu. A presença de diásporo como inclusão no material dos depósitos na Bahia pode ser o principal fator causador de perda de transparência nessas gemas.

- As análises químicas para elementos traços por INAA e ICP, associadas a outras técnicas de laboratório, como o estudo das inclusões sólidas e a espectroscopia no UV-Visível, forneceram importantes informações sobre o coríndon dos depósitos brasileiros. Como normalmente não são primários, esse tipo de investigação pode trazer indicativos sobre possíveis modelos genéticos. O estudo comparativo dos resultados das análises químicas com os dados químicos publicados para outras localidades no mundo leva a interpretar-se uma gênese metamórfica para a maior parte do coríndon das ocorrências brasileiros. Os depósitos de Peixe e Coxim são exceção, sendo a sua assinatura geoquímica mais coerente com origem ígnea, comprovada, no caso de Peixe, pela ocorrência do coríndon em pegmatitos alcalinos. No caso de Coxim, a origem está, possivelmente, relacionada a álcali-basaltos. Os resultados para Malacacheta e Campo Belo não são coerentes com os das demais ocorrências e, portanto, a origem pode ser outra, talvez por processos metassomáticos.

- A identificação das inclusões sólidas e a química mineral indicam um metamorfismo de alto grau de metassedimentos ricos em Al e pobres em Si para o coríndon das regiões de Caratinga-Manhuaçu e Cláudio. A semelhança dos terrenos metamórficos dessas duas regiões com os terrenos da Bahia (Catingal e Paraguaçu), as inclusões de polimorfos de Al_2SiO_5 , tipicamente metamórficos, no coríndon de Indaiá e Sapucaia, e as evidências de campo encontradas por Campos (1999) em Caputira são fortes elementos para indicar o metamorfismo regional de fácies granulito como sendo o gerador desse mineral na região. A similaridade entre a geologia da região de Manhuaçu – Caratinga e a dos importantes depósitos de rubi e safira do Sri Lanka sugere que a região leste de Minas Gerais apresenta potencial favorável para o surgimento de novas ocorrências. Como a região de Malacacheta é constituída de rochas com menor grau metamórfico intrudidas por granitos, é possível que o coríndon tenha se originado por metamorfismo de contato e/ou metassomatismo.

- Depósitos aluvionares diamantíferos de Coxim, Mato Grosso do sul, contêm grãos de coríndon, variedade safira, em associação com o diamante. O alto grau de arredondamento das safiras indica transporte de longa distância. As relações entre os elementos traços indicam basaltos alcalinos como fontes do coríndon. Teores elevados de Fe e baixos de Ti sugerem um mecanismo de cor por transferência de carga entre Fe^{2+} e Fe^{3+} , típico para safiras basálticas e diferente das safiras metamórficas.

- As análises químicas e os espectros de UV-Visível apontam o mecanismo de transferência de cargas entre Fe^{2+} e Ti^{4+} como a principal causa da cor azul nas safiras brasileiras (com exceção de Coxim e Peixe). A presença de Cr^{3+} possivelmente influencia nas tonalidades violeta e púrpura, assim como pode estar associada ao efeito alexandrita e à forte fluorescência de algumas amostras, principalmente em

Palmeiras e Indaiá. Nas amostras de coloração vermelha e rosa os teores de Cr são sensivelmente mais altos, podendo ser vinculados como causa dessas cores.

- As ocorrências que apresentam as melhores características para produção de gemas são Malacacheta (MG) e Coxim (MS) para safiras azuis, Indaiá e Sapucaia (MG) para safiras azuis e violetas e Lajedinho (BA) e Palmeiras (MG) para rubi ou safiras rosa. Em Barra Velha (SC), Palmeiras e Sapucaia (MG) também encontra-se o melhor material para gemas com efeitos ópticos especiais, como asterismo, efeito-alexandrita e efeito seda.

- A presença de fases hidratadas da alumina, especificamente o diásporo encontrado ao longo dos planos de geminação polissintética, resulta em diminuição de transparência e, conseqüente perda de aproveitamento gemológico em Caputira, Sapucaia, Catingal, Lajedinho e Barra Velha. A possibilidade da mudança de fase do diásporo com a perda da água por aquecimento, resultando na transformação em coríndon, sugere algumas perspectivas no sentido de melhoramento dos cristais quanto ao grau de transparência, desde que utilizados os procedimentos de tratamento térmico adequado.

- A aplicação de tratamento térmico no coríndon estudado pode melhorar significativamente a qualidade das gemas e viabilizar uma produção sistemática. As análises químicas e as características descritas mostraram que o coríndon da maior parte das ocorrências se prestaria a transformações por aquecimento em atmosfera adequada.

APÊNDICES

ASPECTOS GEOQUÍMICOS EM SAFIRAS DA REGIÃO DE INDAIÁ, MINAS GERAIS*

Antonio LICCARDO; Hanna JORDT-EVANGELISTA

Entre os mecanismos que causam cor em coríndon, o da safira azul é o mais intrigante e requer um entendimento adequado da composição química e da estrutura cristalina. Seis amostras da safira de Indaiá (região centro-leste de Minas Gerais) foram analisadas em microsonda eletrônica e EDXRF (espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva) com o intuito de se definir quantitativamente os elementos componentes desse mineral objetivando considerações acerca da gênese e da causa da cor. As amostras selecionadas foram três de coloração azul e uma violeta, todas semi-transparentes, e duas opacas, de coloração púrpura. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos por análise eletrônica na microsonda. Tendo-se em vista que o limite de detecção deste equipamento é de cerca de 0,01% (em peso) ou 100ppm (Gomes, 1984), os dados quantitativos de alguns óxidos como MgO, CaO e MnO, cujos valores ficaram abaixo deste valor, foram desconsiderados. Os óxidos de elementos cromóforos, no entanto, foram considerados no sentido qualitativo, isto é, mesmo que seus teores não sejam precisos eles estão presentes e podem estar atuantes em mecanismos de causa de cor. As análises em EDXRF (Tabela 2), no entanto, resultaram em valores bastante próximo dos obtidos com microsonda, apontando um bom grau de confiabilidade desses dados analíticos.

O coríndon é composto essencialmente por Al_2O_3 , estando os outros elementos presentes em quantidades próximas ao limite de detecção do método analítico (à exceção do óxido de ferro). Os elementos traços Fe, Ti, Cr, V e Ga são considerados como cromóforos na safira azul. Os teores obtidos para estes elementos foram: FeO (ferro total) variou de 0,32% a 0,39%; TiO_2 de 0 a 0,03%; Cr_2O_3 de 0,04% a 0,07%; Ga_2O_3 de 0 a 0,06% e V_2O_5 de 0 a 0,03%. Observa-se que o teor de FeO mantém uma certa constância enquanto que os teores dos outros elementos traços muitas vezes caem abaixo do limite de detecção do equipamento.

A análise por Energia Dispersa (EDS) em Fluorescência de Raios X, realizada nos laboratórios do Instituto Gübelin, na Suíça, é o método mais utilizado em gemas para a determinação dos elementos cromóforos. Cinco amostras foram cortadas perpendicularmente ao eixo *c*, em lâminas com espessura aproximada de 1 mm e analisadas por este método. A variação para estes óxidos (% em peso), obtida por EDXRF, é semelhante aos valores obtidos através da microsonda eletrônica (ver Tabelas 1 e 2).

*V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1999, Porto Seguro, BA.

Os resultados analíticos mostram teores relativamente altos para Fe e Ti. É provável que a coloração azul da safira de Indaiá seja causada pela transferência de carga entre os íons Fe^{2+} e Ti^{4+} (Liccardo, 1999), como apregoam os autores em relação a safiras de outras localidades. Entretanto é importante o papel do íon Cr^{3+} na formação das tonalidades que tendem ao violeta, a exemplo das safiras azuis do Sri Lanka (Themelis, 1992). Assim como no Sri Lanka e também na Colômbia (Keller *et al.*, 1985), o fato das gemas de Indaiá também apresentarem efeito de mudança de cor (efeito-alexandrita) e marcante fluorescência em ondas longas de ultravioleta pode ser associado à presença relativamente alta de Cr_2O_3 na sua composição.

Muitas safiras possuem os elementos necessários para uma cor azul profundo, mas não no estado adequado para causar coloração, assim elas possuem pouca ou nenhuma cor. Um tratamento térmico pode retificar esta situação, alterando o estado de valência desses elementos, e trazer à tona a desejável coloração azul que estaria como que num estado latente. Com efeito, as amostras obtidas em Indaiá apresentam muitas características similares à safira azul do Sri Lanka, que tradicionalmente recebe tratamento térmico antes de chegar ao mercado. Assim, as informações analíticas obtidas sugerem, pela presença dos elementos Ti e Fe, um grande potencial para melhoramento dessas safiras em tratamento térmico, permitindo uma melhor valorização como gemas no mercado mundial.

A presença, ainda, de quantidades significativas de Cr_2O_3 em relação a Ga_2O_3 e de Fe_2O_3 em relação a TiO_2 pode ser interpretada como um importante indício de origem metamórfica para essas gemas, conforme estudos de autores modernos (Sutherland *et al.* 1998). Gráficos que representam essas relações têm sido utilizados com êxito no estudo de grande parte dos rubis e safiras no mundo, como ferramenta na compreensão da gênese do mineral.

Agradecimentos: Somos gratos ao Dr. Dietmar Schwartz, chefe do setor de pesquisas do Instituto Gübelin, na Suíça, pelas análises em EDXRF e à Universidade de Brasília, onde se realizaram as análises de microsonda eletrônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GOMES, C.B. (1984) Microsonda Eletrônica: Princípios e Aplicações na Geologia. In:____. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. Edgard Blücher Ltda., p159-208.
- LICCARDO, A. (1999) Safiras de Indaiá, MG – Mineralogia, Geologia e Gemologia. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 126p.
- THEMELIS, T. (1992) The heat treatment of ruby and sapphire. 1st ed. USA, Gemlab Inc, 236p.
- KELLER, P.C.; KOIVULA, J.I. ; JARA, G. (1985) Sapphire from the Mercaderes - Rio Mayo area, Cauca, Colombia. *Gems & Gemmology*, **21**: 20-25.

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.

Tabela 1 – Análises químicas representativas, em % peso, das safiras de Indaiá (análises por microsonda eletrônica).

AMOSTRAS AZUIS							
V₂O₅	0,00	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03
SiO₂	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
TiO₂	0,02	0,01	0,01	< 0,01	0,01	0,02	0,01
Al₂O₃	97,83	99,62	100,30	100,55	100,53	101,51	99,40
Cr₂O₃	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06	0,04	0,06
Ga₂O₃	0,03	0,01	0,06	< 0,01	0,04	0,01	0,02
MgO	< 0,01	< 0,01	0,00	< 0,01	0,00	0,00	0,01
CaO	< 0,01	< 0,01	0,00	< 0,01	0,01	0,00	< 0,01
MnO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01
FeO*	0,34	0,38	0,39	0,37	0,37	0,36	0,37
TOTAL	98,30	100,13	100,85	101,01	101,06	101,98	99,93

AMOSTRA VIOLETA	AMOSTRAS OPACAS					
V₂O₅	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00	0,01
SiO₂	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
TiO₂	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03
Al₂O₃	100,63	100,67	100,05	99,77	100,06	100,05
Cr₂O₃	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05
Ga₂O₃	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	< 0,01	0,00	0,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO*	0,33	0,32	0,39	0,37	0,35	0,34
TOTAL	101,07	101,07	100,53	100,27	100,52	100,52

*Todo Fe como FeO

Tabela 2 – Variação dos teores de elementos traços selecionados, em % peso, nas safiras de Indaiá (análises por EDXRF). *Todo Fe como FeO

♦TiO ₂	0,02 - 0,05%
♦V ₂ O ₅	0,02 - 0,04%
♦Cr ₂ O ₃	0,03 - 0,09%
♦FeO*	0,34 - 0,76%
♦Ga ₂ O ₃	0,01 - 0,03%

GEOQUÍMICA EM AMOSTRAS DE CORÍNDON DO BRASIL*

A. Liccardo
H. Jordt-Evangelista
C. M. Ferreira
A.C.S. Sabioni
N.L. Chodur

Várias ocorrências de coríndon têm surgido no panorama minerário brasileiro, algumas com grande potencial para a produção de gemas. Coríndon de coloração vermelha recebe a denominação de rubi, enquanto que qualquer outra cor caracteriza as variedades de safira. O termo safira, sem especificação de cor, refere-se à safira azul.

As variedades gemológicas do coríndon são ainda pouco conhecidas no Brasil, em virtude de que a produção é ainda incipiente ou de baixa qualidade, sendo que o fornecimento mundial é feito, tradicionalmente, pelos países asiáticos (Tailândia, Sri Lanka, Índia, Camboja e Mianmar). No entanto, o conhecimento das características químicas e do ambiente geológico de formação das gemas brasileiras pode modificar este quadro.

O coríndon é composto quase que totalmente por Al_2O_3 . A composição química de uma gema, em termos de elementos traços, pode revelar importantes informações sobre a sua gênese e contribuir para a compreensão da geologia dos terrenos onde esta gema ocorre. Além disso, a coloração do coríndon (importante fator de valorização em gemas coloridas) tem sua origem associada a certos elementos químicos denominados cromóforos. A cor vermelha do rubi é normalmente associada à presença do elemento cromo, enquanto que as variedades de safira (azul, amarelo, rosa, verde) podem apresentar mais de um elemento como responsável pela cor. No caso de safiras azuis os elementos responsáveis pela coloração são o Fe e o Ti.

Análises de microsonda eletrônica foram realizadas em rubis e safiras azuis de várias localidades do Brasil, a saber, de Rio Coxim (MS), Barra Velha (SC), Indaiá (MG), Malacacheta (MG), Novo Cruzeiro (MG) e Caputira (MG) para verificação dos possíveis elementos cromóforos. Os elementos analisados nessas amostras foram Cr, Fe, Ti e Ga que, apesar de serem encontrados em quantidades muito baixas (ppm) são os mais importantes como fontes de indícios sobre a gênese do mineral e pela influência que podem exercer sobre a coloração final. Os resultados fornecidos pela análise são mostrados na Tabela 1, onde as concentrações são dadas em % peso do óxido do elemento analisado.

*V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, 1999, Porto Seguro, BA.

Tabela 1 – Variação de elementos traços selecionados em amostras de coríndon de diversas procedências no Brasil (% peso).

RUBIS	BARRA VELHA (vermelho-castanho)	CAPUTIRA (vermelho-púrpura)	NOVO CRUZEIRO (vermelho-carmim)
FeO*	0,12 – 1,51	0,00 – 0,34	0,15 – 0,19
TiO ₂	0,00 – 0,43	0,00 – 0,03	0,03 – 0,04
Cr ₂ O ₃	0,03 – 0,83	0,07 – 0,17	0,30 – 0,40
Ga ₂ O ₃	0,00 – 0,05	0,01 – 0,05	0,00 – 0,02

SAFIRAS	NOVO CRUZEIRO (azul escuro)	INDAIÁ (azul-púrpura)	COXIM (azul-verde)	MALACACHETA (azul-amarelo)
FeO*	0,17 – 1,17	0,07 – 0,76	1,03 – 1,26	0,14
TiO ₂	0,21 – 0,73	0,01 – 0,05	0,00 – 0,30	0,25
Cr ₂ O ₃	0,00 – 0,04	0,01 – 0,09	0,00 – 0,02	0,04
Ga ₂ O ₃	0,01 – 0,04	0,00 – 0,03	0,00 – 0,04	0,01

*Todo Fe como FeO

Os resultados analíticos indicam teores relativamente elevados de Fe nas safiras de Rio Coxim, de Ti nas safiras de Novo Cruzeiro e ainda valores significativos de Cr nas safiras de Indaiá e rubis de Barra Velha e Novo Cruzeiro.

Comparativamente, os teores mais elevados de Cr nos rubis de Novo Cruzeiro explicam a tonalidade mais pura de vermelho dessas amostras, enquanto que em Barra Velha e Caputira a presença de maiores quantidades de Fe pode ser a causa de tonalidades escuras e acastanhadas nestes rubis. Campos (1999), em estudos sobre o coríndon de Caputira, atribui a ausência da cor vermelho-puro aos baixos teores de Cr encontrados nesses rubis. Chodur (1997), estudando os rubis de Barra Velha, atribui ao elemento Fe a coloração acastanhada dessas gemas.

Em safiras azuis, o elemento titânio exerce importante papel no mecanismo causador da cor azul, em geral uma transferência de cargas eletrônicas entre o Fe e o Ti. A presença desses elementos é importante também no sentido de fornecer parâmetros para possíveis tratamentos de alteração de cor nas gemas. Safiras como as de Indaiá apresentam, pela sua composição, grande potencial para terem

acentuada a coloração azul, dada a presença desses dois elementos e as características visuais do mineral (Liccardo, 1999).

De acordo com as análises obtidas para a safira de Indaiá é provável que a coloração azul deste mineral seja causada pela transferência de carga entre os íons Fe^{2+} e Ti^{4+} , como é apregoadado em relação a safiras de outras localidades. Entretanto é importante o papel do íon Cr^{3+} na formação das tonalidades que tendem ao violeta, a exemplo das safiras azuis do Sri Lanka (Themelis, 1992). Assim como no Sri Lanka e também na Colômbia (Keller *et al.*, 1985), o fato dessas gemas também apresentarem efeito de mudança de cor (efeito-alexandrita) e marcante fluorescência em ondas longas de ultravioleta pode ser associado à presença relativamente alta de Cr_2O_3 na sua composição (Liccardo, 1999).

No caso das safiras azuis encontradas em Rio Coxim, os teores elevados de Fe e teores relativamente baixos de Ti nessas amostras podem sugerir um mecanismo de cor diferente das outras safiras azuis. Talvez neste caso predomine uma transferência de cargas entre Fe^{+2} e Fe^{+3} , o que por sua vez também representaria fortes implicações genéticas para esse mineral. Na maior parte das safiras associadas a terrenos metamórficos não há participação desse mecanismo como causa de cor, sugerindo possivelmente uma origem não-metamórfica para as safiras de Rio Coxim. Provavelmente, o excesso de Fe seja também o causador de tonalidades esverdeadas nestas gemas, como postulado para safiras de outros lugares do mundo.

Trabalhos recentes em coríndon da Austrália e do Camboja utilizam a relação Cr/Ga e Fe/Ti como indicativo genético do mineral. Sutherland *et al.*(1998) estudando rubis e safiras dessas localidades, sugerem uma distinção entre as de origens metamórfica e basáltica através da geoquímica de elementos traços. Segundo esses autores as concentrações do elemento Ga costumam ser extremamente baixas (<0,01% de Ga_2O_3) em coríndon de origem metamórfica, enquanto que o coríndon associado a rochas basálticas normalmente apresenta concentrações mais altas (0,015 a 0,040% de Ga_2O_3). Claramente uma associação com o estudo geoquímico e mineralógico das rochas encaixantes revela o grande potencial do estudo de elementos-traço como ferramenta na pesquisa genética de coríndon. No caso desses seis depósitos, que são todos secundários (colúvios e aluviões), a utilização desses dados em gráficos comparativos, em associação com os dados de campo pode sugerir novos caminhos na compreensão da gênese de coríndon no Brasil.

Outro aspecto da utilização de geoquímica de elementos-traço em coríndon é a sua aplicabilidade no tratamento termoquímico para melhoramento da qualidade das gemas. Amostras provenientes de algumas dessas localidades foram tratados termicamente por Themelis (1992) revelando resultados altamente promissores. Durante o tratamento existe remobilização de cargas eletrônicas e mesmo de

elementos que podem atuar no escurecimento de certas cores e também no aumento de transparência da gema. Sabioni & Ferreira (1996) afirmam que, na década de 80, entre os rubis e safiras produzidos pelos tradicionais fornecedores da Ásia, 95% das gemas exportadas foram tratadas termicamente. Assim, conforme as características visuais do coríndon e a sua composição química é possível se aplicar tecnologia específica no tratamento das gemas de cada ocorrência. O tratamento térmico em coríndon abrange uma série de possibilidades de alteração das características visuais deste mineral. Além de mudança na coloração da gema, também a transparência pode ser melhorada e ainda pode-se ressaltar, ou mesmo criar, efeitos ópticos especiais como asterismo ou efeito de mudança de cor. Portanto, a aplicação de técnicas de interpretação de dados geoquímicos em coríndon no Brasil revela-se, assim, de fundamental importância no estudo desse mineral, com potencial inclusive para colocá-lo no rol das principais gemas coloridas produzidas em sub-solo brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS J.C.S. (1999) Os Depósitos de Caulim, Ametista e Coríndon a NW de Manhuaçu, MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 179p.

CHODUR N. L. (1997) Mineralogia e geologia dos depósitos de rubi e safira da região de Barra Velha, Santa Catarina. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 210p.

LICCARDO A. (1999) Safiras de Indaiá, MG – Mineralogia, Geologia e Gemologia . Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 126p.

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.

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, Austrália 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.

CARACTERIZAÇÃO E ORIGEM DO CORÍNDON (RUBI E SAFIRA) DE BARRA VELHA, SANTA CATARINA*

Nelson Luiz Chodur – UFPR
Antonio Liccardo – UFOP
Darcy Pedro Svisero - USP

Depósitos sedimentares de coríndon, nas variedades rubi e safira, ocorrem nas proximidades da cidade de Barra Velha (nordeste do Estado de Santa Catarina). A região faz parte do Complexo Granulítico de Santa Catarina, representado por gnaisses granulíticos, rochas ultramáficas, e quartzitos. O coríndon ocorre na forma de cristais euédricos, subédricos e de fragmentos irregulares, na cor vermelha (rubi), e em menor frequência nas cores branca, rósea, cinza e preta (safiras). Apresenta hábito em barrilete característico, transparência limitada e dimensões desde milímetros até 10cm de comprimento. Os cristais exibem partição romboédrica pronunciada em função da ocorrência de diásporo nos planos de geminação polissintética.

O coríndon é constituído essencialmente de Al_2O_3 (96 a 99% em peso) contendo impurezas de Cr_2O_3 (0,00 a 0,83% em peso) e FeO (0,12 a 1,51% em peso). O cromo é o elemento responsável pela cor vermelha ou rósea, enquanto o ferro influi nas colorações escuras e saturação das cores observadas. Como inclusões cristalinas foram identificadas biotita, clorita, zircão, rutilo, monazita, pirita e óxidos de ferro. As inclusões fluidas ocorrem na forma de cristais negativos de contorno hexagonal e canais alongados onde as medidas microtermométricas revelaram que são constituídas essencialmente de CO_2 , cujas temperaturas de fusão são iguais ou inferiores a $-56,6^{\circ}C$. As temperaturas de homogeneização do CO_2 variaram de -25 a $+25^{\circ}C$, sendo as menores, representativas dos fluidos originais, compatíveis com as condições da fácies granulito.

Apesar do coríndon não ter sido encontrado ainda em sua rocha matriz, as evidências de campo e os dados obtidos em laboratório apontam para uma derivação a partir dos terrenos granulíticos subjacentes aos depósitos. A ausência de arredondamento exibida pelo coríndon e demais constituintes dos cascalhos, indica que os depósitos originaram-se a partir das rochas circundantes onde os minerais pesados, representados por fases compatíveis com os granulitos, reforçam essa hipótese. As inclusões sólidas são representadas por minerais compatíveis com o metamorfismo de sedimentos pelíticos antigos, submetidos a metamorfismo de grau médio a alto e as inclusões fluidas, essencialmente carbônicas, são também compatíveis com ambiente anidro necessário para a geração das rochas granulíticas regionais.

*I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 2000, Ouro Preto, MG.

IDENTIFICAÇÃO DE FASES HIDRATADAS EM CORÍNDON NO BRASIL*

Antonio Liccardo – DEGEO/UFOP
Nelson Luiz Chodur – DEGEO/UFOP
Hanna Jordt Evangelista – DEGEO/UFOP
Geraldo Magela da Costa – DEQUI/UFOP

Foram analisadas amostras de sete ocorrências de coríndon ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) sendo uma de Santa Catarina (Barra Velha), uma de Mato Grosso do Sul (Rio Coxim), três de Minas Gerais (Indaiá, Sapucaia e Malacacheta) e duas da Bahia (Catingal e Lajedinho), com o objetivo de constatar a presença de fases hidratadas da alumina tais como diásporo ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$), bohemita ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$), gibbsita ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e bayerita ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$). A presença destes minerais ao longo dos planos de geminação polissintética do hospedeiro resulta normalmente em perda de transparência e com conseqüente perda de aproveitamento gemológico.

Estes minerais, quando associados ao coríndon ou como produto de sua alteração, normalmente são de difícil identificação por meios ópticos, por isso as amostras foram moídas e submetidas a análises térmica diferencial (ATD), termo-gravimétrica (TG), espectroscopia no infra-vermelho e difratometria de raios X. O coríndon é estável em altas temperaturas (2000°C), não devendo portanto apresentar nenhuma perda de massa por aquecimento. Assim, qualquer reação observada na TG pode ser atribuída à presença de outras fases minerais associadas. As amostras estudadas, com exceção de Malacacheta e Coxim, apresentaram na ATD uma reação endotérmica entre 450 e 520°C e na TG uma perda de massa nesta mesma faixa de temperatura. Como pela difração de raios-X observou-se a presença de diásporo, é pertinente associar esta perda de massa à liberação de água da fase hidratada.

Os resultados obtidos permitem estabelecer uma correlação entre a presença do diásporo e o grau de transparência do coríndon analisado. Neste caso as amostras de Malacacheta e Coxim apresentam-se com maior transparência e sem indícios da presença de fases hidratadas, enquanto que as restantes (Barra Velha, Indaiá, Sapucaia, Catingal e Lajedinho) apresentaram o diásporo associado, o que possivelmente seja a causa da falta de transparência desses cristais.

A possibilidade da mudança de fase do diásporo com a perda da água por aquecimento, resultando na transformação em coríndon, sugere interessantes perspectivas no sentido de melhoramento dos cristais quanto ao grau de transparência, desde que utilizados os procedimentos de tratamento térmico adequado. Além disso, as análises térmica diferencial e termo-gravimétrica mostraram-se eficientes na identificação de fases hidratadas em coríndon, principalmente quando intercaladas na estrutura do hospedeiro, como no caso do diásporo localizado nos planos de geminação do coríndon.

*I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 2000, Ouro Preto, MG.

ELEMENTOS-TRAÇOS EM CORÍNDON COMO INDICADORES DE SUA ORIGEM*

Antonio Liccardo – Universidade Federal de Ouro Preto
Nelson Luiz Chodur – Universidade Federal do Paraná
Hanna Jordt-Evangelista – Universidade Federal de Ouro Preto

Ocorrências de coríndon no Brasil, em sua grande maioria, são formadas por depósitos secundários, com pouco ou nenhum vestígio da rocha na qual se originou o mineral. A análise de elementos-traços tem sido usada, juntamente com o estudo de inclusões, como ferramenta para uma associação com o processo geológico que originou o mineral, principalmente no caso das variedades gemológicas (rubi e safira), onde as análises não podem ser destrutivas. A fluorescência de raios X (EDXRF) é uma das técnicas utilizadas para a determinação dos elementos Cr, Ga, Fe e Ti, presentes na estrutura do coríndon como “impurezas”, na ordem de ppm. Os principais processos geradores de coríndon são metamorfismo regional, metassomatismo, cristalização em pegmatitos (associados a rochas alcalinas) e como xenocristais em basaltos alcalinos. Teores mais elevados de Cr e mais baixos em Ga e Fe apontam origem metamórfica para o coríndon, enquanto que, no caso de origem basáltica, aumentam Fe, Ti e, em menor escala, também o Ga e diminui o Cr. Dos depósitos estudados no Brasil, apenas o coríndon do Mato Grosso do Sul (Rio Coxim) pode ter sua gênese associada a rochas basálticas, enquanto que o material das ocorrências do leste de Minas Gerais (Indaiá, Caputira, Palmeiras e Sapucaia), da Bahia (Anagé, Lajedinho e Catingal) e de Santa Catarina (Barra Velha) apresentam teores relativamente altos de Cr em relação ao Ga, apontando uma origem metamórfica para esse coríndon.

*VII Congresso Brasileiro de Geoquímica e I Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, 2001, Curitiba, PR.

ASPECTOS GEOQUÍMICOS NA COR DE RUBIS E SAFIRAS DO BRASIL*

Antonio Liccardo – Universidade Federal de Ouro Preto
Nelson Luiz Chodur – Universidade Federal do Paraná
Hanna Jordt-Evangelista – Universidade Federal de Ouro Preto

Alguns rubis e safiras encontrados no Brasil apresentam tonalidades pouco desejáveis, como o azul muito escuro em safiras do Mato Grosso do Sul e as tonalidades castanhas em rubis e safiras rosadas de Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina. A cor vermelha do rubi é causada pela presença de Cr_2O_3 , mas as tonalidades castanhas ou azuladas nessa gema são atribuídas à presença de Fe_2O_3 . A compreensão do mecanismo causador de cor e o conhecimento dos teores, bem como o estado de valência do elemento Fe podem permitir o melhoramento da cor dessas gemas através de um tratamento térmico ou termoquímico adequado. Análises químicas em amostras das localidades citadas apontaram o excesso de Fe_2O_3 como o provável agente causador das tonalidades indesejáveis.

Em relação à safira encontrada no Mato Grosso do Sul, semelhante ao material que ocorre na Austrália, a tonalidade escura do azul pode ser modificada para tons mais claros em tratamento térmico com atmosfera redutora. Modificações de cor podem ser introduzidas nos rubis e safiras rosadas de Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina à medida que se modifique o estado de valência do elemento Fe, à semelhança do que ocorre nos principais países produtores de rubi no mundo (Tailândia, Myanmar, Sri Lanka e Camboja), onde tal técnica é amplamente utilizada.

*VII Congresso Brasileiro de Geoquímica e I Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, 2001, Curitiba, PR.

GÊNESE DE CORÍNDON EM TERRENOS METAMÓRFICOS DE ALTO GRAU, REGIÃO DE CATINGAL, BAHIA*

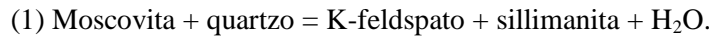
Hanna Jordt-Evangelista
Antonio Liccardo

A cerca de 20 km da localidade de Catingal, vizinhanças de Manoel Vitorino, na região centro-sul da Bahia, aflora um gnaiss portador de coríndon. As coordenadas geográficas da ocorrência são: latitude 13°56'54'' S e longitude e 40°37'45'' W. O gnaiss faz parte dos terrenos metamórficos de alto grau integrantes de núcleos antigos, em geral preservados, do Arqueano. O coríndon constitui barriletes de até 3 cm de eixo maior, possui coloração variando de castanho-escuro até verde-amarelado e baixa transparência. A ocorrência desse mineral na rocha hospedeira é rara em regiões de clima tropical, tendo em vista a facilidade com que esta é alterada por intemperismo em comparação com o coríndon, o qual é, normalmente, encontrado em aluviões e colúvios. O estudo mineralógico e textural de rochas com coríndon é relevante, porque permite interpretar a gênese desse mineral e contribuir para o entendimento da origem do mesmo em depósitos secundários encontrados em regiões semelhantes em termos geológicos, tais como as ocorrências gemológicas da região de Caratinga-Manhuaçu, em Minas Gerais.

O gnaiss de Catingal é composto de álcali-feldspato pertítico a mesopertítico (cerca de 43% em volume), plagioclásio (30%), biotita (20%), coríndon (5%), sillimanita (2%) e traços de zircão, monazita e mineral opaco, este intercrescido com espinélio verde. O coríndon constitui porfiroblastos idioblásticos, comumente emoldurados por agregado de grãos de álcali-feldspato. Maclas do tipo polissintéticas são abundantes. Incipiente alteração retrometamórfica gerou filossilicato de finíssima granulação em fraturas do coríndon e franjas de biotita verde-clara em torno de opacos. Através de microscópio eletrônico e difratometria de raios X foram identificadas as seguintes inclusões sólidas no coríndon: diásporo, zircão, monazita e óxido de ferro, possivelmente hematita. A presença de diásporo, que normalmente se concentra em planos de geminação polissintética, parece ser a principal causa da diminuição da transparência do coríndon.

*XLI Congresso Brasileiro de Geologia, 2002, João Pessoa, PB.

Coríndon pode ser gerado, em rochas metamórficas, em temperaturas relativamente baixas, de 400 a 450°C, pela decomposição de diásporo. No entanto, no gnaiss de Catingal a associação com álcali-feldspato e sillimanita, além da presença de espinélio, indicam condições metamórficas de altas temperaturas. Duas reações podem ter gerado a paragênese encontrada:



Para pressões de 3 a 6 kbar essa reação ocorre entre cerca de 650 e 700°C, formando sillimanita e parte do álcali-feldspato da rocha. No caso de quantidade insuficiente de quartzo, o que é indicado pela ausência do mesmo nas amostras estudadas, a moscovita não consumida na reação (1) pode ter-se decomposto totalmente em coríndon e álcali-feldspato adicional segundo a reação:



Essa reação ocorre em temperaturas um pouco mais elevadas, entre 680°C e 750°C, o que leva a se concluir que o coríndon de Catingal é metamórfico de alto grau. A mesma gênese é provável para o coríndon, em parte gemológico, de colúvios e aluviões na região de Caratinga – Manhuaçu, no leste de Minas Gerais, constituída de terrenos metamórficos de alto grau semelhantes à da região de Catingal.

ELEMENTOS TERRAS RARAS EM CORÍNDON DE MINAS GERAIS*

Antonio Liccardo, Ester Oliveira Figueiredo, João Addad, Hanna Jordt-Evangelista

Ocorrências de coríndon em Minas Gerais concentram-se em três regiões principais: Cláudio-Campo Belo (sudoeste), Caratinga-Manhuaçu (leste) e Malacacheta (centro-norte). Amostras de sete ocorrências foram analisadas quimicamente, perfazendo um total de 25 análises (2 em Cláudio e 2 em Campo Belo, na região sudoeste; 5 em Palmeiras, 5 em Sapucaia, 3 em Caputira e 5 em Indaiá, na região leste e 3 em Malacacheta, na região centro-norte). As amostras foram pulverizadas, tratadas com ácidos (HCl, HNO₃ e HF) e lavadas, de modo a minimizar a interferência de inclusões e impurezas nos resultados das análises químicas. O material foi submetido a análise por ativação neutrônica no CDTN/CNEN, em Belo Horizonte. Cerca de 500mg do pó foram irradiados no reator TRIGA MARK-I IPR-R1 juntamente com amostras-padrão. Os teores dos elementos foram obtidos com base na comparação dos espectros do padrão com o da amostra. Essa técnica é apropriada para a quantificação de elementos traços, com resultados excepcionais para elementos Terras Raras (na ordem de ppm, com incertezas menores que 4%).

Os resultados das análises dos elementos Tb, Th, Ce e La mostram teores relativamente mais elevados para as amostras do campo Caratinga-Manhuaçu e teores muito baixos ou abaixo do limite de detecção para as dos outros campos. Nas de Cláudio, os elementos citados não foram detectados. Em uma amostra de Campo Belo há 10ppm de Th e em uma de Malacacheta há 3ppm de La. Para o campo Caratinga-Manhuaçu, em todas as amostras foram detectados os citados elementos. Em Palmeiras os teores de Tb variam de 1 a 8ppm, Th de 8 a 51ppm, Ce de 98 a 368ppm e La de 16 a 150ppm. Em Sapucaia, os teores são: Tb - 1 a 5ppm, Th - 7 a 35ppm, Ce - 21 a 532ppm e La - 3 a 206ppm. Em Indaiá os teores são: Tb - 1 a 3ppm, Th - 9 a 29ppm, Ce - 66 a 159ppm e La - 19 a 81ppm. Finalmente, em Caputira os teores são: Tb - 1 a 29ppm, Th - 1 a 32ppm, Ce - 0 a 1ppm e La - 1 a 3ppm. São marcantes, nesses resultados, a presença relativamente constante de Th nas ocorrências do campo Caratinga-Manhuaçu e os teores relativamente elevados de Ce para Palmeiras, Sapucaia e Indaiá.

As ocorrências estudadas estão todas em depósitos secundários. A origem da mineralização não pôde ser determinada devido à ausência de afloramentos das rochas portadoras do coríndon. No entanto, os indícios geológicos apontam para uma gênese por metamorfismo regional de alto grau na área de Caratinga-Manhuaçu e, possivelmente, metassomatismo nos campos de Malacacheta e Cláudio-Campo Belo. O estudo de elementos traços, especialmente Cr, Ga, Fe e Ti, tem sido utilizado em ocorrências de outras partes do mundo na tentativa de se definir o tipo de processo que dá origem ao coríndon. Os resultados obtidos para os elementos Terras Raras mostram que o coríndon da região de Caratinga-Manhuaçu, cuja origem é metamórfica de alto grau, apresenta teores mais elevados desses elementos do que as outras regiões, o que provavelmente reflete diferentes processos genéticos. Portanto conclui-se que o estudo comparativo de elementos do grupo das Terras Raras pode ser utilizado como ferramenta no entendimento dos processos genéticos do coríndon.

*XLI Congresso Brasileiro de Geologia, 2002, João Pessoa, PB.

CORÍNDON DE CLÁUDIO E CAMPO BELO, SUDOESTE DE MINAS GERAIS*

Antonio Liccardo
João E. Addad
Júlio Cesar Mendes
Hanna Jordt-Evangelista

A região de Cláudio e Campo Belo situada no sudoeste de Minas Gerais, está inserida na porção meridional do Cráton São Francisco. Nestas localidades encontrou-se coríndon em depósitos secundários, provenientes da decomposição de litologias pertencentes a complexos metamórficos neoarqueanos a paleoproterozóicos. Estes complexos apresentam corpos gnáissicos, metaultramáficos e intrusivas granitóides.

Na ocorrência de Cláudio, localizada a cerca de 6km a leste desta cidade, o coríndon é encontrado predominantemente num manto de alteração e raramente observa-se cristais encaixados em rocha metaultramáfica alterada, que mostra a presença de uma foliação metamórfica. Neste caso, os cristais de coríndon estão envolvidos por uma capa alterada, caulínica, que condiciona a sua liberação da encaixante por ser facilmente removida intempericamente. Os cristais apresentam coloração castanho avermelhada, são perfeitamente euédricos, centimétricos (com até 10cm de comprimento) e com zonamentos de cor bastante pronunciados. O depósito de Campo Belo, localizado a 15km NE da cidade de Campo Belo, em direção a Oliveira, é caracteristicamente eluvionar-coluvionar.

Os cristais são encontrados dispersos em um nível de rocha muito intemperizada, totalmente liberados de sua encaixante, em uma área de latossolos e relevo com topos planos e encostas suaves. Apresentam tamanho variável, chegando a 14mm de comprimento máximo e diâmetro de até 8mm. Grande parte dos cristais se mostra euédrico, na forma típica de “barril” de seção hexagonal e cor azul clara. Zonamento de cor concêntrico pode ser observado em grãos partidos, em uma tonalidade clara de azul com tendência a ser mais escura na parte central, se mostrando manchada por trilhas esbranquiçadas nas suas bordas. O caráter euédrico dos grãos e as bordas agudas de fragmentos partidos indicam transporte quase nulo, ou seja, proximidade da rocha-fonte.

Estes corindons apresentam, de um modo geral, teores relativos mais elevados de ferro e cromo, em detrimento do alumínio. Os teores de FeO (total em %peso) para as ocorrências variam entre 0,65 e 0,74%, os de Cr₂O₃, entre 0,51 e 1,04%, analisados com microsonda eletrônica. À semelhança da região leste mineira (eixo Caratinga-Manhuaçu), a presença destas duas ocorrências em uma região com uma geologia muito similar aponta para a possibilidade de surgimento de novas ocorrências e/ou jazidas de coríndon com qualidade gemológica.

*XI Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2001, Belo Horizonte, MG

DEPÓSITOS DE CORÍNDON NA FAIXA CARATINGA-MANHUAÇU, MINAS GERAIS*

Antonio Liccardo,
João E. Addad,
Hanna Jordt-Evangelista

Na faixa metamórfica Caratinga-Manhuaçu, ocorrem vários depósitos secundários de coríndon. Em termos de geomorfologia, os depósitos coluvionares encontram-se em colúvios e vales suspensos encaixados, onde obstáculos provocaram a retenção do fluxo de sedimento em armadilhas de relevo. Os níveis mineralizados correspondem a horizontes em paleocolúvios e paleoaluviões, compostos por seixos e blocos de gnaisses e quartzo, além de matriz argilo-arenosa. Estes paleodepósitos se encontram recobertos por colúvios e aluviões atuais, incluindo sistemas paludares (brejos). Os quatro principais depósitos situam-se nas localidades de Indaiá, Sapucaia, Palmeiras e Caputira.

Estão associados a rochas metamórficas de médio a alto grau (biotita gnaisses, granada biotita gnaisses, às vezes com sillimanita, cianita e espinélio), biotita gnaisses com hiperstênio, migmatitos e charnoquitos). Não foram encontrados litotipos com o coríndon *in situ*, entretanto, devido ao relevo que determina depósitos proximais em vales restritos, considera-se que as rochas-fontes estariam encaixadas nos litotipos que caracterizam a região. Dentre as rochas estudadas, um biotita granada gnaisse, contendo sillimanita e cianita encontrado em Indaiá, pode ser considerada aquela com maior potencial para gerar coríndon, por ser rica em alumínio e relativamente empobrecida em sílica. No entanto, mesmo esse litotipo contém algum quartzo e obviamente nenhum coríndon, já que os dois minerais são incompatíveis. As possíveis porções portadoras de coríndon não foram encontradas, possivelmente porque a ausência de quartzo torna essa rocha pouco resistente à alteração e erosão. Alguns grãos de coríndon apresentam moscovita (retrometamórfica) e caulim aderidos, mas a grande maioria está completamente liberada de restos da rocha de origem, mesmo quando evidentemente proximais (angulosidade e faces euédricas evidenciam curta distância de transporte).

O material produzido apresenta potencial para aproveitamento gemológico. Entre os depósitos, foram encontrados fragmentos de coríndon de até 5cm, sendo que a faixa aproveitável como qualidade gema se restringe ao máximo de 8mm. A cor do material varia do azul índigo ao vermelho acastanhado, passando por tonalidades púrpuras e violetas. Além disto, alguns exemplares apresentam efeitos óticos particulares, como asterismo e efeito-alexandrita. Estudos comparativos entre o coríndon destes depósitos e a sua associação com a geologia regional, apontam a existência de uma zona com potencial para o surgimento de novas ocorrências e depósitos deste mineral em Minas Gerais.

*XI Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2001, Belo Horizonte, MG

QUÍMICA COMPARADA DE CINCO OCORRÊNCIAS DE CORÍNDON EM MINAS GERAIS

Antonio Liccardo
João E. Addad
Hanna Jordt-Evangelista

O coríndon apresenta composição química simples, na sua fórmula ideal, Al_2O_3 . Entretanto, elementos substitutivos fornecem indicações de origem e condição de cristalização, além de representarem fatores causadores de intensidade e tonalidade de cor.

Amostras de coríndon de cinco localidades em Minas Gerais foram analisadas por microsonda eletrônica para os elementos ferro, titânio, cromo e gálio. Os cinco depósitos situam-se nas localidades de Indaiá, Sapucaia, Palmeiras e Caputira, estas alinhadas na faixa metamórfica Manhuaçu-Caratinga, e em Cláudio, sudoeste de Minas Gerais. Dados analíticos obtidos mostraram diferenças químicas significativas entre as ocorrências, basicamente os teores de ferro e cromo. Os valores resultantes das análises para titânio e gálio foram desconsiderados por estarem todos abaixo do limite de detecção. Os teores de FeO (total em % peso) para as cinco ocorrências são: Cláudio – 0,65 a 0,74%; Indaiá – 0,34 a 0,47%; Palmeiras – 0,34 a 0,40%; Sapucaia – 0,26 a 0,80%; Caputira – 0,18 a 0,23%. As variações de teores de Cr_2O_3 para as cinco ocorrências são: Cláudio – 0,51 a 1,04%; Indaiá – 0,04 a 0,11%; Palmeiras – 0,09 a 0,13%; Sapucaia – 0,01 a 0,02%; Caputira – 0,15 a 0,17%.

Entre as ocorrências da faixa Manhuaçu-Caratinga, os teores de FeO (total) são mais elevados no coríndon de Indaiá, enquanto o de Cr_2O_3 é relativamente baixo. As três outras ocorrências da faixa Manhuaçu-Caratinga apresentaram teores mais baixos tanto para o Cr_2O_3 quanto para o FeO (total). Entre estas últimas, Caputira e Palmeiras mostraram um enriquecimento de Cr_2O_3 , em relação a Sapucaia, que apresentou, em contrapartida, uma tendência de FeO (total) mais alto. Estes padrões de teores mostraram-se discriminantes entre as regiões de ocorrência: Cláudio, com Cr_2O_3 e FeO (total) simultaneamente mais elevados; faixa Manhuaçu-Caratinga com teores comparativamente mais baixos.

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DA SAFIRA DE SAPUCAIA, EM MINAS GERAIS*

Antonio Liccardo - UFOP
Nelson Luiz Chodur - UFPR
Hanna Jordt Evangelista – UFOP

No estado de Minas Gerais, no município de Sapucaia, a cerca de 250km de Belo Horizonte, nas cabeceiras do córrego Ferrugem, foi constatada, recentemente, a ocorrência de cristais de coríndon da variedade safira. Nesta região ocorrem litologias pertencentes a terrenos metamórficos de alto grau, como granulitos, gnaisses e charnoquitos. Em alguns depósitos secundários originados a partir destas rochas já foram registradas, nos últimos anos, duas outras ocorrências deste mineral, relativamente próximas de Sapucaia, a de Indaiá e a de Caputira.

A safira de Sapucaia ocorre como cristais euédricos, subédricos e em fragmentos irregulares, nas cores azul, púrpura, violeta, verde e preta. Apresenta hábito característico, com prismas hexagonais alongados e muitas vezes terminados em bipirâmides, sendo a 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, sendo que uma parte pode ter aproveitamento gemológico, apesar de fortemente fraturados; 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, ocorre ainda 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). As características ópticas principais são pleocroísmo moderado a forte (azul/azul escuro) e índice de refração de 1,759/ 1,762 e 1,768, com birrefringência máxima registrada de 0,009.

A descrição preliminar da safira encontrada em Sapucaia aponta boas possibilidades de aproveitamento gemológico para esse material, à semelhança da safira de Indaiá, principalmente em relação às cores azul e violeta, e aos efeitos ópticos especiais apresentados,. Possivelmente esse aproveitamento poderá ser melhorado se essas safiras forem tratadas termicamente, como já acontece em outras localidades que produzem material semelhante.

*I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 2000, Ouro Preto, MG.

CARACTERIZAÇÃO E QUÍMICA PRELIMINARES DO CORÍNDON DE CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO, MINAS GERAIS*

João Eduardo Addad – DERN -UFES
Antonio Liccardo – DEGEO - UFOP
Nelson Luiz Chodur – DEGEOL -UFPR
Ester Figueiredo de Oliveira – CDTN/CNEN

No município de Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais (cerca de 280km a NE de Belo Horizonte) foram encontrados, em depósitos secundários, grãos de coríndon com interesse gemológico/mineralógico. Foram realizados estudos nesse mineral para uma caracterização preliminar, tanto em relação aos elementos cromóforos do coríndon como para suas possibilidades genéticas.

Os grãos de coríndon foram recuperados a partir de depósitos coluvionares de encostas de rochas paragneissicas, associadas a anfibolitos e xistos miloníticos, nas proximidades da localidade de Sapo, em Conceição de Mato Dentro. Concentrados foram obtidos e revelaram a seguinte associação de minerais pesados: ilmenita, zircão, xenotímio e monazita. Os grãos de coríndon não apresentam feições de transporte, mantendo arestas agudas e hábito original, com cores variando do verde-acastanhado ao verde-acinzentado, eventualmente em zoneamentos concêntricos, translúcidos a opacos por acúmulo de inclusões, tamanho entre 2 e 5 mm.

Gemologicamente esse material mostra um intenso efeito alexandrita, com uma coloração predominantemente verde sob a luz do dia e coloração violeta, às vezes púrpura, quando iluminada com luz incandescente. É marcante também o forte pleocroísmo, nas cores verde-verde escuro e índices de refração variando de 1,760 a 1,765 para o raio ordinário e 1,767 a 1,770 para o raio extraordinário. Sob luz ultravioleta de ondas longas esse material apresenta reação moderada para o vermelho.

Resultados químicos foram obtidos através de análise por ativação neutrônica no CDTN/CNEN em Belo Horizonte. Duas amostras foram pulverizadas, tratadas com ácidos (HCl, HNO₃ e HF) e lavadas, de modo a minimizar a interferência de inclusões e impurezas nos resultados. Cerca de 500mg do pó foram irradiados no reator TRIGA MARK-I IPR-R1 juntamente com amostras-padrão e os teores dos elementos foram obtidos com base na comparação dos espectros.

*XLI Congresso Brasileiro de Geologia, 2002, João Pessoa, PB.

A análise revelou os seguintes teores para elementos menores e traços: Fe, 4652ppm; Ti, 1147ppm; Ga, 278ppm; Na, 143ppm; K, 118ppm; Cr, 83ppm; V, 59ppm; La, 33ppm. Uma interpretação prévia dessa composição química permite inferir uma origem da coloração esverdeada como estando associada ao elevado teor de ferro, sobrepondo-se ao mecanismo de transferência de carga Fe-Ti, caracteristicamente causador de tonalidades azuis. O efeito de mudança de cor, tipo alexandrita, pode ser atribuído à presença de cromo e vanádio, considerados os principais causadores desse fenômeno. O coríndon desta ocorrência apresenta uma anomalia no teor de gálio, consideravelmente mais elevado em relação ao coríndon metamórfico de outras localidades.

TRATAMENTO TÉRMICO EM CORÍNDON: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NO BRASIL*

A.Liccardo
A.C.S. Sabioni
H. Jordt-Evangelista
C.M. Ferreira

Tratamento térmico de gemas é o processo pelo qual a aplicação do calor, em condições controladas, permite a modificação da qualidade de uma gema em termos de coloração, transparência e efeitos ópticos especiais, (tais como efeito-alexandrita, acatassolamento ou asterismo) agregando valor a esta gema. Esse processo apresenta importância cada vez maior no mercado internacional de gemas, principalmente em se tratando de rubis e safiras.

O coríndon é um óxido de alumínio de fórmula Al_2O_3 , cujas variedades gemológicas são definidas unicamente pela coloração. Essa coloração é dada por elementos cromóforos presentes na forma de impurezas em quantidades, concentrações e proporções diversas. Alguns tipos de tratamento térmico podem corresponder a processos que ocorrem na natureza e, neste caso, a cor que a gema adquire é estável, tornando-se difícil a distinção desta de uma gema com coloração natural idêntica. Essas gemas são comercializadas sem a menção “*tratadas*”. Embora muitas safiras possuam as “impurezas” necessárias para uma cor azul profundo, estas não se encontram no estado de oxidação adequado para causar a coloração, de modo que a gema possui pouca ou nenhuma cor. Um tratamento térmico pode retificar esta situação (alterando o estado de valência destas “impurezas”) e trazer à tona a coloração azul que estaria como que num estado latente.

Rubis podem ter sua transparência melhorada, sua coloração uniformizada e mesmo efeitos especiais podem ser criados nessas gemas. Uma outra variedade de tratamento térmico é o processo de difusão, que não tem correspondente na natureza. Esse processo consiste na dopagem da gema por difusão de certos elementos no estado sólido, em altas temperaturas. Ambos os processos são amplamente utilizados em rubis e safiras de todo o mundo, sendo que com esse último as gemas são comercializadas com a menção “*gemas naturais tratadas por difusão*”.

Apesar do Brasil não estar entre os principais produtores de coríndon no mundo, começam a ser descobertas várias ocorrências desse mineral, algumas das quais com produção de material de bom potencial para aproveitamento gemológico. Muitas dessas ocorrências podem tornar-se economicamente competitivas, se o coríndon nelas produzido passar por um processo de tratamento térmico específico. O desenvolvimento de tecnologia de tratamento de coríndon no Brasil deve, conseqüentemente, desempenhar um papel decisivo em futura produção sistemática de rubis e safiras, viabilizando jazidas e melhorando a qualidade do material já existente.

*I Simpósio Brasileiro de Tratamento e Caracterização de Gemas, 2000, Ouro Preto, MG.

KORUND IN BRASILIEN*

Antonio Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista

Introdução

O coríndon, nas suas variedades rubi e safiras, é o mineral gemológico mais importante depois do diamante, além de ser raro com boa qualidade de mercado. Hughes (1990) afirma que rubis e safiras, diferentemente de diamantes e outras gemas, são caracteristicamente gemas asiáticas. A tecnologia e a aceitação de tratamentos a partir dos anos 80 e a descoberta de novas reservas na Ásia incrementaram o valor e a demanda de rubis e safiras (Themelis, 1992). Kane (1999) discorrendo sobre as possibilidades de rubi e safiras no novo milênio aponta que não somente o mercado demandará maiores quantidades desse material, como também diferentes qualidades de coríndon deverão se tornar comercializáveis. Esse autor pondera ainda que 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.

Terrenos granulíticos semelhantes aos do Sri Lanka (grande produtor de rubis e safiras) e aumento do número de ocorrências no Brasil (Liccardo & Chodur, 2000) são os primeiros indícios de possibilidades comerciais para o coríndon na América do Sul. Além disso as novas técnicas de tratamento de gemas estão viabilizando ocorrências até há pouco consideradas anti-econômicas.

Historicamente a presença de coríndon no Brasil tem sido relatada desde os anos 30, mas sempre em ocorrências inexpressivas e sem viabilidade econômica. Na década de 60 safiras azuis (secundariamente 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 de gemas, mas com produção incipiente ou ainda com cristais muito pequenos. Nos anos 90 a principal ocorrência foi Indaiá, em Minas Gerais, que durante dois ou três anos apresentou produção constante em escala comercial, mas que está estacionada desde 1996.

*versão para o português do artigo inserido no capítulo 3

Situação Atual

Entre as ocorrências noticiadas e estudadas contam-se pelo menos 28 espalhadas pelo Brasil, 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).

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 baixa, mas 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, o depósito de Barra Velha (Chodur, 1997), produz intermitentemente rubis e safiras rosa com baixa transparência, mas com interessantes efeitos de asterismo e seda (silk). Na Paraíba, esporadicamente surgem ocorrências localizadas (p.ex. Patos), associadas a pegmatitos com pequena produção de safira azul, também com baixa transparência. Em Tocantins e Rio de Janeiro, o coríndon azul encontrado associado às rochas alcalinas surge em grande quantidade, mas sem qualidade gemológica.

A melhor situação encontra-se em Minas Gerais, onde depósitos como os de Malacacheta e Indaiá (Liccardo, 1999) - com interessantes cristais azuis / transparentes de qualidade gemológica comprovada - e as novas ocorrências de Palmeiras e Sapucaia (Liccardo & Jordt-Evangelista, 2001) - com belíssimos (apesar de pequenos) exemplares de rubis e safiras azul e violeta com efeitos de alexandrita, asterismo e silk - com condicionantes geológicos semelhantes, sugerem um potencial extremamente favorável para essa região. 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.

Perspectivas

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. Este é um fator de fundamental importância para esse tipo de gema, pois a maior parte do material descartado como sendo de baixa qualidade poderia ter seu valor sensivelmente

aumentado se devidamente tratado. Como conseqüência, a implementação desse processo pode viabilizar novas jazidas. Análises preliminares realizadas em várias amostras mostraram que boa parte do material apresenta composição química adequada para mudanças de cor se tratadas termicamente.

Considerando-se a demanda de rubis e safiras no mercado mundial e as perspectivas de produção nos depósitos tradicionais (Mogok, Kashmir...) abrem-se boas perspectivas para a produção desse mineral também no Brasil. O aumento no número de novas ocorrências e as novas tecnologias em *enhancement* (tratamento/melhoramento) apontam um futuro promissor para o coríndon brasileiro nesse mercado.

É possível que o caso do coríndon seja semelhante ao das esmeraldas brasileiras na década de 60. Nesta época o mercado mundial não aceitava essas gemas alegando diferenças na composição química. Mais tarde verificou-se que se trata de uma questão de tradição de mercado, o que exige um certo tempo para assimilação. Hoje as esmeraldas têm sua qualidade reconhecida mundialmente. Tudo aponta para que o Brasil venha a fornecer rubi e safiras ao mercado mundial nos próximos anos com a mesma facilidade com que produz todas as outras gemas.

DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS ANALÍTICAS APLICADAS NO ESTUDO DO CORÍNDON.

1 - Difractometria de Raio X

O uso da técnica clássica de difratometria de raios X é eficiente para a identificação de grande parte dos minerais. A difração de raios X por cristais resulta de um processo em que os raios X são dispersos pelos elétrons dos átomos sem mudança de comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido por dispersão somente quando algumas condições geométricas são satisfeitas. Os raios X são difratados pelos diversos planos atômicos do cristal, onde qualquer plano correspondente a uma face hkl pode ser considerado. Os resultados são registrados em diagramas que reproduzem os espaçamentos interplanares do mineral e compreendem posições e intensidades das linhas de difração, permitindo desse modo a leitura e a identificação rápida do material (Azárof & Buerger, 1958).

Amostras de coríndon foram transformadas em pó para estas análises, no sentido de se obter a confirmação do coríndon e também a identificação de possíveis minerais inclusos ou agregados ao mineral, como por exemplo diásporo ou bohemita (fases hidratadas do coríndon).

O equipamento utilizado, pertencente ao Departamento de Geologia da UFOP é o difratômetro automatizado RIGAKU, modelo GEIGERFLEX D/MAX-B, com goniômetro horizontal, utilizando-se radiação $\text{CuK}\alpha$, filtro de Ni e condições de excitação de 20 mA e 40 kV. Os registros foram realizados com a contagem de 1000 cps., velocidade do goniômetro de 2°/min, velocidade do papel de 2cm/min e intervalo de exposição de 5-70°. Como fonte de radiação foi utilizado um tubo de Cu, com voltagem de 20-60kV e corrente de 2,5-50mA. Como programa de software na apresentação dos resultados usou-se o JADE 3.0 e o ORIGIN.

2 - Espectroscopia no Infravermelho

Esta técnica possui aplicação na mineralogia em geral como complemento às análises de difratometria de raio X. É um método que fornece informações sobre identificação e estrutura de compostos químicos, inclusive substâncias amorfas.

O espectro no infravermelho é um dado importante para complementar a investigação das características dos minerais, como a determinação do arranjo e a simetria dos grupamentos atômicos e moleculares, o estudo da influência nas substituições iônicas em estruturas minerais e a presença de impurezas na rede cristalina (Marel & Beutelpacker 1976).

A dispersão da amostra numa matriz de brometo de potássio, sólida e transparente, é a técnica mais utilizada para obtenção dos espectros. Para obtenção destes espectros para o coríndon usou-se um espectrofotômetro PERKIN ELMER, modelo 1760 X, acoplado a um computador também PERKIN ELMER, MODELO 7700, pertencentes ao Departamento de Química da Universidade Federal de Ouro Preto. Neste equipamento os espectros foram registrados na faixa de 4000 até 400 cm^{-1} com medições a cada 4 cm^{-1} , numa média de sinais de aproximadamente 100 scans. Estes dados foram tratados pelos softwares Excel, Origin e Minpet.

Os resultados dessa análise nas amostras de coríndon, juntamente com outras, revelou a presença de picos de OH, que foram associados à presença de fases hidratadas, já que o coríndon é um mineral anidro.

3 - Espectroscopia no Ultravioleta-Visível-Infravermelho Próximo

Basicamente o método consiste em um feixe de luz que atravessa a amostra sendo depois detectado pelo equipamento. Devido aos diversos elementos químicos presentes na amostra, certos comprimentos de onda podem ser absorvidos ou transmitidos, criando um espectro de absorção devidamente registrado em diagramas, onde a posição e a intensidade das bandas de absorção podem revelar importantes informações diagnósticas a respeito do material (Hughes, 1990).

A interpretação de seus resultados é semelhante à espectroscopia no infravermelho, onde certas anomalias gráficas fornecem indícios de composição, podendo-se detectar a presença de elementos de transição tais como ferro, cromo e vanádio, considerados como cromóforos em potencial do coríndon. Essa técnica não-destrutiva aplicada em fatias transparentes de coríndon foi realizada nos laboratórios do Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná. O aparelho utilizado foi um espectrofotômetro Hewlett-Packard, Diode Array, modelo 8452A que foi calibrado com ar (branco), tempo de integração de 1 segundo e aquisição entre 190 e 820nm. As amostras foram colocadas em um porta-amostras padrão, criado especificamente para essas fatias.

4 – ATD e ATG

Análises térmicas, de maneira geral, referem-se a investigações do comportamento de materiais submetidos a variação térmica gradual e controlada. Na análise térmica diferencial (ATD) a amostra de coríndon é colocada em posição simétrica com uma substância termicamente inerte, dentro de um forno envolvendo termopares muito sensíveis. Quando o sistema recebe aquecimento ou resfriamento a uma taxa constante, as diferenças de temperatura entre a amostra e o padrão são detectadas pelo termopar e ao

mesmo tempo convenientemente registradas. Se a variação de temperatura da substância provoca reações físicas, químicas ou físico-químicas como mudança de fase, pirólise ou oxidação, os calores latentes envolvidos, a produção ou absorção do calor em determinadas gamas de temperatura são registrados. Na análise termogravimétrica (ATG) é examinada a massa da amostra em função do incremento de temperatura. Essa técnica é utilizada para avaliar a decomposição e a estabilidade térmica de materiais sob condições variáveis, além de registrar a cinética dos processos físico-químicos que ocorrem na amostra. Ambas as técnicas são utilizadas concomitantemente e no caso das amostras de coríndon apontaram somente variações em minerais inclusos ou agregados, pois o coríndon puro é anidro e não apresentaria reações. Através dessas técnicas, juntamente com outras, detectou-se a presença de fases hidratadas do coríndon, como diásporo e bohemita.

5 - Microscopia Eletrônica de Varredura

Conhecida na literatura em língua inglesa como SEM (Scanning Electron Microscope), a Microscopia Eletrônica de Varredura ou MEV constitui-se numa técnica para a obtenção de imagens da superfície de materiais. As imagens no MEV são obtidas através de um feixe de elétrons de diâmetro muito reduzido e de comprimento de onda deste feixe muito curto, sendo possível a geração de imagens de alta resolução, com aumentos de até 800.000 vezes (o limite prático utilizado é normalmente de até 75.000 vezes, Gabriel, 1992).

Além da obtenção das imagens, o equipamento dispõe de um espectrômetro acoplado capaz de detectar os raios X emitidos pela amostra durante a excitação produzida pelo bombardeamento de elétrons. O feixe de raios X carrega uma energia característica e um comprimento de onda que revelam a composição dos elementos da amostra, combinando assim informações da morfologia com análises semi-quantitativas. O equipamento é composto por um cátodo de filamento de tungstênio que em relação ao ânodo gera um potencial positivo originando feixes de elétrons controlados. O feixe produzido é então colimado por um conjunto de lentes eletromagnéticas responsáveis também pela ampliação e pelo foco da imagem e incide sobre a amostra previamente metalizada. Os elétrons secundários e retroespalhados são assim detectados, ampliados e enviados a uma tela, mostrando a imagem da superfície varrida sincronicamente (Gabriel, 1992).

O uso deste equipamento em pequenas fatias polidas do coríndon permitiu a obtenção de importantes informações no estudo das inclusões sólidas deste mineral. O equipamento utilizado foi um aparelho EDAX DXY PHILIPS XL-30 que se encontra no Laboratório Central de Pesquisa e Desenvolvimento do convênio COPEL/UFPR, em Curitiba.

6 - Microsonda Eletrônica

A análise por microsonda eletrônica é um recurso para a obtenção da composição química de um material sem destruí-lo, apresentando portanto, grande interesse e conveniência na aplicação em mineralogia. Além disso a análise permite rapidez e visualização simultânea do resultado.

A técnica permite a determinação da composição química de uma área muito pequena na superfície polida e metalizada do mineral. A análise se dá através da incidência de uma corrente de elétrons de alta energia, gerados em alto vácuo, na amostra, de onde são emitidos os comprimentos de ondas característicos dos elementos presentes no mineral. Esse feixe de elétrons incide na amostra com um diâmetro da ordem de 1 μ m. A incidência do feixe eletrônico na superfície da amostra provocará a formação de raios X, em consequência da interação de elétrons de alta energia com os átomos dos elementos presentes na amostra. Se a radiação emanada pela amostra for comparada com um padrão de radiação tem-se, então, uma análise quantitativa (Gomes, 1984).

As pastilhas de resina contendo as amostras de coríndon foram analisadas de modo pontual, com cerca de cinco pontos por amostra. Entretanto, para a determinação de elementos traços (muito importantes no caso de coríndon) essa técnica não se revelou suficientemente acurada.

O equipamento utilizado nestas análises foi a microsonda CAMEBAX, modelo SX 50 CAMECA, no Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. Este equipamento fornece análises qualitativas (EDS) e quantitativas (4 espectrômetros WDS). As condições de funcionamento do aparelho foram de 15 kV e 25 nA.

7- INAA

Para a determinação da composição química elementar em teores de traço, foi aplicada a ativação neutrônica instrumental (INAA), utilizando-se o método paramétrico (κ_0). Essa técnica tem sido utilizada extensivamente como ferramenta na detecção de elementos traços em minerais e é especialmente vantajosa no caso de coríndon, em virtude desse mineral apresentar uma matriz relativamente simples.

As amostras de coríndon, padrões e materiais de referência certificados, foram irradiadas no reator TRIGA MARK-I IPR-R1 (CDTN/CNEN, Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, de Belo Horizonte, MG), em uma mesa giratória, em torno do núcleo do reator sob um fluxo de nêutrons térmicos uniforme de $6,6 \times 10^{11}$ ncm⁻²s⁻¹. As análises foram acompanhadas com soluções padrões multielementares de terras-raras, tório e materiais de referência certificados. Foram utilizados como referências padrões geológicos USGS (United States Geological Survey): GXR-5 e IAEA (International

Atomic Energy Agency): Soil-1, Soil-3, Soil-7. Todas as amostras de coríndon, padrões e materiais de referência certificados foram pesados com uma massa de 0,3000 g e acondicionados em tubos de irradiação apropriados.

Essa técnica é apropriada para a quantificação de elementos traços, com resultados excepcionais para elementos Terras Raras (na ordem de ppm, com incertezas menores que 4%). A metodologia adotada é apresentada na tabela abaixo e baseia-se nas experiências do Setor de Radioquímica do CDTN/CNEN em análise por ativação neutrônica de diversas matrizes.

Tabela 1 - Metodologia adotada na investigação dos radionuclídeos de meia-vida curta, média e longa.

	Ti	Te	Tc
Investigação dos elementos de meia-vida curta.	5 min	15 min	600 Seg
Investigação dos elementos de meia-vida média.	4 horas	12 horas	1 hora
Investigação dos elementos de meia-vida longa.	16 horas	30 dias	3 horas

Ti, Te, Tc = tempo de irradiação; espera e contagem, respectivamente.

Os espectros gama foram medidos em um detector HPGe ORTEC modelo 10175-P, FWHM de 1,85 keV para a energia de 1332 keV do ^{60}Co , acoplado a microcomputador por eletrônica apropriada/Maestro II. Os principais elementos investigados foram: Dy, Ba, Ti, As, Mg, V, Al, Mn, Cu, Cl (radionuclídeos meia-vida curta); W, Na, La, Au, Ga, As, K, Th, U (radionuclídeos de meia-vida média); Ce, Tb, Cr, Zn, Sc, Sr, Sb, Cs, Sc, Rb, Fe, Co, Ta, Ag, Eu, Tb (radionuclídeos de meia-vida longa). Para a interpretação dos resultados analíticos, os elementos caracterizados foram divididos em três grupos: metais de transição; metais alcalinos, alcalinos terrosos e elementos representativos; terras-raras, incluindo o Th e Ta devido ao comportamento geoquímico semelhante. Para os materiais de referência certificados, os resultados obtidos apresentam uma boa concordância com os valores certificados, o que garante a boa qualidade das análises.

8 - ICP/OES

A espectrometria atômica em geral é muito utilizada para a determinação de elementos traços em vários materiais, inclusive minerais. Essa técnica detecta as radiações eletromagnéticas (luz) que são

absorvidas e/ou emitidas por átomos da amostra. A espectrometria de emissão óptica (OES) é uma das possibilidades de associação em plasma indutivamente acoplado (ICP). Em ICP-OES, a luz emitida pelos átomos e íons excitados no plasma é medida para obter a concentração de elementos na amostra. As amostras excitadas no plasma emitem luz em diferentes comprimentos de onda, sendo por isso a emissão policromada. Essa radiação policromada deve ser separada em comprimentos de onda individuais para a identificação do elemento, através de um monocromador (Boss & Fredeen 1999).

Nessa técnica, a amostra dissolvida é decomposta por intenso aquecimento em plasma, gerando átomos livres e íons dos elementos envolvidos. O plasma é uma forma de matéria gerada pela ionização do gás argônio e suas principais características são as de conduzir eletricidade e de ser afetado por campo magnético. A ionização por colisão do gás argônio ocorre em cadeia, quebrando o gás dentro do plasma constituído por átomos de argônio, elétrons e íons de argônio, o que caracteriza o plasma indutivamente acoplado (ICP) e átomos da amostra (Boss & Fredeen 1999).

Amostras sólidas devem ser dissolvidas em ácido para análises em ICP e, em alguns casos, é necessário um processo de abertura por fusão antes da digestão em ácido, procedimento este adotado no caso do mineral coríndon. O equipamento utilizado foi um Perkin-Elmer Optima 3000, em leitura direta, utilizando os procedimentos do laboratório Lakefield-Geosol, de Belo Horizonte (MG). Foram analisados os elementos Cr, Ti, Mn e V para complementar as análises por INAA.

9 - Análises Gemológicas

Para a verificação das características do coríndon como gema os testes rotineiros envolveram os seguintes equipamentos:

Polariscópio – equipamento composto por filtros polarizadores cruzados e iluminação transmitida que permite definir o caráter óptico do mineral analisado.

Balança eletrônica e picnômetro com água foram utilizados para obtenção de valores de densidade.

Dicroscópio – o modelo empregado foi o dicroscópio de calcita, equipamento este que, com base na dupla refração acentuada deste mineral, permite que se possa verificar a intensidade e cores do pleocroísmo dos minerais anisótropos coloridos.

Filtro Chelsea – trata-se de um filtro que absorve certos comprimentos de onda de luz, mostrando as gemas observadas através dele com cores características, conforme a composição química destas gemas.

Refratômetro (TOPCON) – é o equipamento mais eficiente para determinação da autenticidade de uma gema. Com ele é possível registrar-se com precisão os índices de refração de materiais sólidos, que apresentem ao menos uma face polida, além do valor de birrefringência determinado pela diferença entre o índice maior e o índice menor.

Luz Ultravioleta – para se verificar efeitos de fluorescência ou fosforescência no material analisado. Expõe-se este material a uma fonte de emissão de luz ultravioleta de ondas longas ($\lambda=366\text{nm}$) e ondas curtas ($\lambda=253,7\text{nm}$).

Completando a caracterização gemológica foram empregados, para observação de inclusões, um microscópio gemológico e líquidos pesados para imersão das amostras na observação de suas inclusões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azàroff, L.V. ; Buerger, M.J. - 1958 - The powder method in X-ray crystallography. New York, McGraw-Hill, 342p.
- Boss C.B.; Fredeen, K.J. 1999. *Concepts, instrumentation, and techniques in Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*. 2nd. Ed., Perkin-Elmer, USA, 85p.
- Gabriel, B.L. – 1992 – Sem: A user's for materials science. American Society for Metals, Library Of Congress Catalog – EUA. 198p.
- Gomes, C.B. – 1984 -. Microsonda Eletrônica: Princípios E Aplicações Na Geologia. In: ____. Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia. São Paulo, Edgard Blücher, 159-208.
- Hughes, R.W. 1990. *Corundum*. 1ed.London, Butterworth-Heinemann Ltd.314p.
- Marel, H.W.; Beutelpacker, H. – 1976 – Atlas of infrared spectroscopy of clay mineral and their admixtures. Amsterdam, Elsevier. 396 p.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE CORÍNDON ESTUDADAS

Indaiá	19° 38' 00" S 42° 21' 50" W
Malacacheta	17° 42' 02" S 42° 04' 34" W
Paraguaçu	13° 02' 44" S 40° 46' 56" W
Catingal	13° 56' 54" S 40° 37' 45" W
Lajedinho	15° 06' 34" S 40° 48' 36" W
Sapucaia	19° 54' 34" S 42° 15' 89" W
Canaã	14° 12' 30" S 40° 44' 31" W
Cláudio	20° 24' 00" S 44° 41' 09" W
Palmeiras	20° 09' 07" S 42° 04' 58" W
Campo Belo	20° 50' 45" S 45° 07' 43" W
Caputira	20° 12' 35" S 42° 13' 27" W
Peixe	12° 52' 04" S 48° 34' 50" W
Barra Velha	26° 31' 06" S 48° 43' 50" W
Coxim	54° 30' 00" S 17° 53' 00" W