



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA ECONÔMICA E
APLICADA**

**MINERALOGIA, TIPOLOGIA E CAUSAS DE COR DE
ESPODUMÊNIOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO
BRASIL E QUÍMICA MINERAL DE NB-TANTALATOS DA MINA DA
CACHOEIRA (MINAS GERAIS)**

Coralie Heinis Dias

Orientador: Prof. Mario Luiz de Sá C. Chaves

Co-Orientador: Prof. Dr. Klaus W. H. Krambrock

Belo Horizonte, fevereiro de 2015

Nº 150

**MINERALOGIA, TIPOLOGIA E CAUSAS DE COR DE
ESPODUMÊNIOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO
BRASIL E QUÍMICA MINERAL DE NB-TANTALATOS DA MINA DA
CACHOEIRA (MINAS GERAIS)**

Dissertação de Mestrado apresentada junto ao Colegiado de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Autora: Coralie Heinis Dias

Orientador: Prof. Dr. Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves (IGC/UFMG)

Co-Orientador: Prof. Dr. Klaus Wilhelm Heinrich Krambrock (ICEx/UFMG)

Belo Horizonte

2015



ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA CORALIE HEINIS DIAS

Realizou-se, no dia 26 de fevereiro de 2015, às 14:00 horas, Sala 3051, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *Mineralogia, química mineral e causas de cor de espodumênios da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Minas Gerais)*, apresentada por CORALIE HEINIS DIAS, número de registro 2013651869, graduada no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Mário Luiz de Sá Carneiro Chaves - Orientador (IGC-UFMG), Prof(a). Paulo Roberto Gomes Brandão (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Francisco Javier Rios (CDTN/CNEN).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Aprovada condicionalmente, sujeito a alterações, conforme folha de modificações, anexa.

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 26 de fevereiro de 2015.

Prof(a). Mário Luiz de Sá Carneiro Chaves (Doutor)

Prof(a). Paulo Roberto Gomes Brandão (Doutor)

Prof(a). Francisco Javier Rios (Doutor)

AGRADECIMENTOS

Ao orientador e ao co-orientador desta dissertação, Professores Drs. Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves e Klaus Wilhelm Heinrich Krambrock, pelo constante apoio, e discussões sempre construtivas. Em especial ao primeiro, por me introduzir ao fascinante universo dos pegmatitos, e permitir que meus estudos fossem voltados a essa área.

Ao engenheiro de minas Luiz Alberto Dias Menezes Filho (*in memoriam*), pela cessão de amostras, algumas de muito difícil obtenção, e inestimáveis contribuições ao campo da Mineralogia.

Ao Professor Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão, do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, pelas análises de difração de raios-X e valiosas discussões.

A Michele Aparecida Flores Costa, colaboradora do Professor Dr. Klaus Krambrock, do Departamento de Física da UFMG pelo extraordinário empenho na realização de análises, interpretações e discussões sobre EPR e absorção ótica.

Aos Professores Dr. Antônio Wilson Romano, do Instituto de Geociências da UFMG, e Dr. Pierre de Brot, do CEFET-MG, pelas pertinentes observações e recomendações durante o seminário da disciplina de Estudos Supervisionados; e aos Professores Dr. Paulo Roberto Gomes Brandão, do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, e Dr. Francisco Javier Rios, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), integrantes da banca de defesa, pelas sugestões e correções valiosas e enriquecedoras.

Ao Professor Dr. Fernando Soares Lameiras, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) e à sua colaboradora Helena Silva pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao geólogo Dr. Luis Rodrigues Armoa Garcia e ao físico Marcio Flores, pela realização das análises por microsonda eletrônica e discussões.

Aos colegas de IGC Luiz Antônio Silveira, pelo acompanhamento em trabalhos de campo e discussões construtivas; e Augusto Cruz, Jonas Carvalho Silveira e Bruno Freitas Bakir, por sempre proporcionarem um ambiente de amizade e colaboração.

Ao Afonso, João e Pablo, de Galiléia; e José Batista Coutinho, o “Zé da Estrada”, de Araçuaí, que acompanharam, guiaram e/ou colaboraram nas visitas aos distritos de Conselheiro Pena e Araçuaí, auxiliando na localização de pegmatitos e afloramentos, alguns deles abandonados.

A todas as pessoas da CBL (Araçuaí), em nome do engenheiro Mitsuru Kataoka, que por tantas vezes nos receberam gentilmente, e cederam amostras para a realização de estudos.

Aos colegas, professores e funcionários do Instituto de Geociências da UFMG e ao próprio Instituto, por permitir o uso de suas instalações, laboratórios e veículos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao longo deste trabalho.

Aos meus pais, Marie Claire e Cláudio, e minha irmã Guanayra, pelo amor e apoio incondicional. Ao meu companheiro Agenor, pela enorme paciência e compreensão, e suporte em todas as horas.

E finalmente a todas as pessoas que não foram citadas aqui, mas que de alguma forma influenciaram e me ajudaram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Localização e acesso	14
2	OBJETIVOS, RELEVÂNCIA E METODOLOGIA DE TRABALHO	16
2.1	Objetivos	16
2.2	Relevância.....	16
2.3	Metodologia de trabalho	17
3	ESPODUMÊNIO EM PEGMATITOS – CARACTERÍSTICAS GERAIS	18
3.1	Aspectos históricos	18
3.2	Mineralogia, cristal química e gemologia.....	20
3.3	O lítio e seus usos	22
3.4	O ambiente pegmatítico	23
3.5	Lítio em pegmatitos	33
4	A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO BRASIL – ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	36
4.1	Distrito Pegmatítico de Araçuaí.....	40
4.2	Distrito Pegmatítico de São José da Safira	40
4.3	Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena	41
4.4	Pegmatitos Estudados	41
4.4.1	Mina da Cachoeira.....	42
4.4.1.1	Nb-tantalatos da mina da Cachoeira.....	45
4.4.2	Lavra da Chapadinha.....	46
4.4.3	Lavra de Neves	47
4.4.4	Lavra da Santa Rosa	49
4.4.5	Urucum.....	51
4.4.6	Lavra do Jairo Lingüiça.....	54
4.4.7	Lavra da Sapucaia	55
5	ANÁLISES COM MICROSSONDA ELETRÔNICA.....	57
5.1	Aspectos gerais	57
5.2	Análises pertinentes	58
5.2.1	Espodumênios	58
5.2.2	Feldspatos.....	60
5.2.3	Nb-tantalatos	61
6	ANÁLISES POR ESPECTROSCOPIA DE MASSA (ICP-MS)	66
7	ANÁLISES DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – ESTUDO DAS CAUSAS DE COR	72
7.1	Aspectos gerais	72
7.2	Análises pertinentes	72
8	ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO ÓTICA	76
8.1	Aspectos gerais	76

8.2	Análises pertinentes	76
9	DISCUSSÕES GERAIS.....	80
10	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	ANEXO I – Paper submetido à Revista da Escola de Minas	95
	ANEXO II – Resultados completos das análises por difração de raios-X.....	106
	ANEXO III – Resultados completos das análises por microsonda eletrônica.....	110
	ANEXO IV – Resultados completos das análises por ICP-OES/ICP-MS/AAS.....	124

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

Figura 1.1 – Localização da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e sua relação com o Orógeno Araçuaí.....	13
Figura 1.2 – Espodumênios com aspectos distintos. A. Variedade kunzita. B. Variedade hiddenita (norte-americana). C. Espodumênio verde amarelado brasileiro. D. Espodumênio industrial verde escuro.....	14
Figura 1.3 – Localização dos municípios onde se situam os depósitos estudados em relação a Belo Horizonte (ponto A), Galiléia (ponto B), Resplendor (ponto C), Itambacuri (ponto D), Araçuaí (ponto E) e Itinga (ponto F).	15
Figura 3.1 – Amostra de espodumênio variedade kunzita do Pegmatito Córrego do Urucum, Galiléia	18
Figura 3.2 – Amostra de espodumênio variedade hiddenita do Afeganistão	19
Figura 3.3 – Amostra de espodumênio verde pálido da Lavra do Jairo Lingüiça, Resplendor, Minas Gerais.....	20
Figura 3.4 – Aspecto geral de um granito gráfico: quartzo (cinza) em microclínio (branco) ..	24
Figura 3.5 – Modelo geral de segregação pegmatítica dentro de um granito.....	25
Figura 3.6 – Modelos de estruturas assimétricas, em corte transversal, de pegmatitos zonados	28
Figura 3.7 – Zonamento de pegmatitos LCT.....	29
Figura 3.8 – Campos de P e T esquemáticos das rochas encaixantes regionais que abrigam pegmatitos.....	30
Figura 3.9 – Diagrama de fases experimental dos aluminossilicatos de lítio.....	34
Figura 4.1 – Mapa geológico do Orógeno Araçuaí e seus entornos.....	37
Figura 4.2 – Principais distritos pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil no Estado de Minas Gerais	38
Figura 4.3 – A. Mapa do grupo pegmatítico da Cachoeira, mostrando os corpos pegmatíticos (incluindo projeções do subsolo) da mina da CBL, modificado de Romeiro (1998). B. Acesso ao interior da mina da Cachoeira. C. Galeria em pleno desenvolvimento no interior da mina da Cachoeira.	43
Figura 4.4 – A. Contato do pegmatito com o xisto. B. Detalhe do pegmatito da mina da Cachoeira, ressaltando os cristais de espodumênio (Esp). C. Amostras de feldspatos da mina da Cachoeira. D. Amostras de espodumênio da mina da Cachoeira.	43
Figura 4.5 – Esquema mostrando a tendência de crescimento dos cristais para o topo do corpo	45
Figura 4.6 – Amostras de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira.	46
Figura 4.7 – A. Entrada alagada de uma galeria de acesso ao pegmatito da Chapadinha. B. Amostra do pegmatito da Chapadinha. C. Amostras de espodumênio verde gemológico, com variadas intensidades de cor, da lavra da Chapadinha. D. Amostras de feldspatos da lavra da Chapadinha.	47
Figura 4.8 – A. Entrada da galeria de acesso ao pegmatito de Neves. B. Detalhe do processo de albitização/caulinização. C. Amostras de feldspato da lavra de Neves. D. Amostras de espodumênio verde gemológico, com variadas intensidades de cor, da lavra de Neves.....	49
Figura 4.9 – Lavra da Santa Rosa. A. Ponto de acesso ao local de retirada do material da lavra subterrânea. B. Detalhe da placa de entrada da lavra, com dados do processo no DNPM. C. Vista geral da pilha de rejeitos.	50

Figura 4.10 – A. Amostras de feldspatos da lavra da Santa Rosa. B. Amostras de espodumênio do tipo “palmito” da lavra. C. Amostras de espodumênio rosa claro, não gemológico.	51
Figura 4.11 – A. Ponto de acesso à lavra do Urucum. B. Entrada da galeria principal da lavra do Urucum. C. Amostras de feldspatos da lavra do Urucum. D. Amostras de kunzita da lavra do Urucum.	52
Figura 4.12 – Esboço geológico da lavra do Córrego do Urucum	52
Figura 4.13 – Exemplar de excepcional qualidade (uma “masterpiece” mineralógica) de espodumênio kunzita com terminação em hiddenita da lavra do Jairo Linguíça, com 19 cm de comprimento.....	55
Figura 5.1 – A. Diagrama ternário mostrando conteúdos relativos de Ta ₂ O ₅ , Nb ₂ O ₅ e SnO ₂ . O grupo 1 representa composições de columbita-tantalita, enquanto o grupo 2 mostra uma fase mais rica em Sn, revelada como ixiolita. B. Diagrama quadrilateral da columbita, mostrando a posição das amostras analisadas na solução sólida.	63
Figura 5.2 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am3 – columbita-(Fe), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.	63
Figura 5.3 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am7 (tantalita-(Fe) + ixiolita), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.	64
Figura 5.4 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am9 (tantalita-(Fe) + ixiolita), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.	65
Figura 6.1 – Conteúdos de terras-raras em espodumênios analisados.	71
Figura 6.2 – Conteúdos de terras-raras em feldspatos analisados.	71
Figura 7.1 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde gemológico do pegmatito de Neves, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C por 10 minutos cada.	74
Figura 7.2 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde amarelado gemológico da mina da Cachoeira, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C por 10 minutos cada.....	74
Figura 7.3 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde amarelado gemológico do pegmatito da Chapadinha, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C) por 10 minutos cada	75
Figura 8.1 – A. Amostra de hiddenita dos Estados Unidos. B. Amostras de espodumênio verde de Neves.....	77
Figura 8.2 – Espectros de absorção de espodumênio verde gemológico: (a) da lavra de Neves; (b) dos Estados Unidos (hiddenita verdadeira).....	78
Figura 8.3 – Espectros de absorção de espodumênio verde amarelado gemológico, antes e após irradiação a 200 kGy: (a) da mina da Cachoeira; (b) da lavra da Chapadinha.	79
Figura 9.1 – Representação esquemática dos estágios de cristalização do espodumênio em pegmatitos da PPOB.	83

Quadros

Quadro 1.1 – Pegmatitos alvos deste projeto e os municípios em que se localizam.....	15
Quadro 3.1 – Principais subdivisões da classificação geológica, paragenética e geoquímica de pegmatitos graníticos.....	35
Quadro 4.1 – Distritos Pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil no Orógeno Araçuai.....	39
Quadro 9.1 – Principais características dos pegmatitos estudados.....	80

Tabelas

Tabela 5.1 – Análises com microsonda eletrônica em espodumênios de diferentes tipos e localidades.....	59
Tabela 5.2 – Análises de espodumênios “industriais” de Portugal e de kunzitas de diferentes países por “via úmida” (Charoy et al., 1992).	60
Tabela 5.3 – Análises com microsonda eletrônica em microclínios e albitas de diferentes pegmatitos.....	61
Tabela 5.4 – Análises com microsonda eletrônica de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira...	62
Tabela 5.5 – Análises com microsonda eletrônica em amostra de columbita-(Fe) Am3 com diferentes intensidades de cor.....	64
Tabela 5.6 – Análises com microsonda eletrônica de diferentes fases relacionadas a diferenças de cor na amostra Am7	64
Tabela 5.7 – Análises com microsonda eletrônica de diferentes intensidades de cor (e composições químicas) na amostra Am9	65
Tabela 6.1 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos maiores e menores em espodumênios dos pegmatitos estudados.	66
Tabela 6.2 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos traços em espodumênios dos pegmatitos estudados.	67
Tabela 6.3 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos terras-raras em espodumênios dos pegmatitos estudados.....	68
Tabela 6.4 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos maiores e menores em feldspatos dos pegmatitos estudados.....	68
Tabela 6.5 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos traços em feldspatos dos pegmatitos estudados.	69
Tabela 6.6 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos terras-raras em feldspatos dos pegmatitos estudados.	70
Tabela 9.1 – Razões K/Rb e Rb/Ba de feldspatos.	82
Tabela III.1 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em feldspatos e espodumênios (25/11/2013).	110
Tabela III.2 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em feldspatos e espodumênios (03/06/2014).	114
Tabela III.3 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (27/11/2013).....	118
Tabela III.4 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em Nb-tantalatos (13/03/2014).	120

RESUMO

O espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) é um mineral de lítio que ocorre na natureza principalmente em pegmatitos. Além do seu aproveitamento como uma importante fonte de lítio, ele também tem utilidade como mineral gemológico, nas suas variedades rosa (kunzita), verde esmeralda (hiddenita) e verde/verde amarelada. No entanto, pouco tem sido feito no sentido de ampliar o conhecimento das suas ocorrências e/ou jazidas conhecidas em Minas Gerais. No Brasil, o espodumênio ocorre especialmente em pegmatitos heterogêneos, em vários depósitos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira (PPOB). A PPOB abrange uma superfície de aproximadamente 150.000 km², a maior parte situada na porção leste do estado de Minas Gerais, especificamente na unidade geotectônica denominada Orógeno Araçuaí.

O propósito deste trabalho foi estudar vários corpos pegmatíticos em que ocorrem diferentes tipos e variedades de espodumênio, a fim de definir seus aspectos químicos e causas de cor, além de comparar tais ocorrências na Província Pegmatítica Oriental do Brasil. As lavras estudadas foram: Chapadinha (Itinga), Cachoeira (Araçuaí/Itinga), Neves (Araçuaí), Jairo Linguíça (Resplendor), Sapucaia (Galiléia), Urucum (Galiléia) e Santa Rosa (Itambacuri). Nestas lavras, foram coletadas amostras de espodumênios e feldspatos, além de Nb-tantalatos na mina da Cachoeira, analisados por microsonda eletrônica e/ou ICP-MS. Esses últimos também foram analisados por difração de raios-X, que permitiu a identificação de ixiolita, mineral nunca antes descrito na PPOB. Além disso, com o objetivo de estudar as causas de cor em espodumênios verdes e verde amarelados, tais amostras foram também submetidas a análises de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) e espectroscopia de absorção ótica.

As análises por microsonda eletrônica revelaram poucas variações passíveis de comparações. Pôde ser percebido, no entanto, que as amostras de espodumênios verdes/verde amarelados apresentam teores de ferro consideravelmente superiores aos das amostras de espodumênio rosado. Através das análises de EPR e absorção ótica, foi possível estabelecer que a componente amarela da cor desses espodumênios é causada pelo íon Fe^{3+} .

Em relação ao ambiente pegmatítico em que os espodumênios ocorrem, a maioria dos corpos estudados possui como rocha hospedeira os xistos, ou seja, são algo distantes do granito fonte. Tais corpos podem ser classificados como grandes, ou seja, de espessuras entre

15 e 50 m, e todos apresentam um considerável grau de fracionamento com relação a seus fluidos formadores.

Por fim, com relação à variedade de tipos de espodumênios diferentes, percebeu-se que correspondem a estágios de cristalização distintos e, conseqüentemente, diferentes ambientes/condições de formação. Foi possível distinguir cinco tipos diferentes de espodumênios, cada um deles relacionado a um estágio de cristalização do pegmatito sob condições primárias até hidrotermais, de acordo com as temperaturas decrescentes de cristalização.

ABSTRACT

Spodumene ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) is a lithium-bearing mineral, which occurs mainly in pegmatites. Besides its use as an important lithium source, it is also a gemmologic mineral, with its varieties: pink (kunzite), emerald-green (hiddenite) and green/yellowish-green. However, there has been few efforts in order to expand knowledge about its known occurrences and/or deposits in Minas Gerais State. In Brazil, spodumene occurs especially in heterogeneous pegmatites, within several deposits in the Eastern Brazilian Pegmatite Province (EBPP). EBPP encompasses a surface of about 150.000 km², and most of it is situated on the eastern part of Minas Gerais State, specifically in the geotectonic unit called Araçuaí Orogen.

The aim of the present work was to study various pegmatite bodies in which different types and varieties of spodumene occur, in order to define its chemical aspects and causes of color, besides comparing such occurrences in the EBPP. The studied deposits were: Chapadinha (Itinga county), Cachoeira (Araçuaí/Itinga counties), Neves (Araçuaí county), Jairo Linguíça (Resplendor county), Sapucaia (Galiléia county), Urucum (Galiléia county) e Santa Rosa (Itambacuri county). In such deposits, samples of spodumene and feldspars were collected, in addition to Nb-tantalates from the Cachoeira Mine, analyzed by electron microprobe and/or ICP-MS. The latter minerals were also analyzed by X-ray diffraction, which allowed the recognition of ixiolite, a mineral that had never been described in the EBPP before. Besides, green/yellowish-green spodumene samples were submitted to electronic paramagnetic resonance (EPR) and optical absorption spectroscopy, in order to study its causes of color.

Electron microprobe analysis revealed few variations which could be compared. However, it could be observed that green/yellowish-green spodumene samples showed iron contents significantly higher than pink spodumene samples. It could be established, through EPR and optical absorption analyses, that the yellow component of spodumene colors is caused by Fe^{3+} ion.

In relation to the pegmatite environment in which spodumene occurs, most of the studied bodies is emplaced in schists, somewhat distant from the parent granite. Most of them are classified as wide (between 15 and 50 m) and all show significant fractionation degree, with regard to their fluids of formation.

Finally, with regard to the variety of different spodumene types, it was observed that each one corresponds to distinct crystallization stages and, consequently, different environment/conditions of formation. Five different types of spodumene were distinguished, related to different formation stages of the pegmatite under primary to hidrothermal conditions, according to decreasing temperatures of crystallization.

1 INTRODUÇÃO

O Estado de Minas Gerais é famoso pela grande variedade de minerais extraídos em seus muitos e variados depósitos. Em termos de diversidade, a maior parte destes minerais são provenientes de pegmatitos. Tais rochas magmáticas apresentam textura predominantemente grossa e podem conter belíssimos e/ou raros exemplares de muitos minerais.

Dentre estas espécies minerais, inclui-se o espodumênio, que pode formar cristais de dimensões métricas, e possui três variedades gemológicas – a kunzita, rosa; a hiddenita, verde esmeralda; e o espodumênio amarelo/verde amarelado – além de uma de qualidade não gemológica, maciça – designada comumente de espodumênio “industrial”.

Os pegmatitos contendo espodumênio que são objetivos de estudo do presente trabalho inserem-se geologicamente na Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB), contida tectonicamente no Orógeno Araçuaí (Figura 1.1).

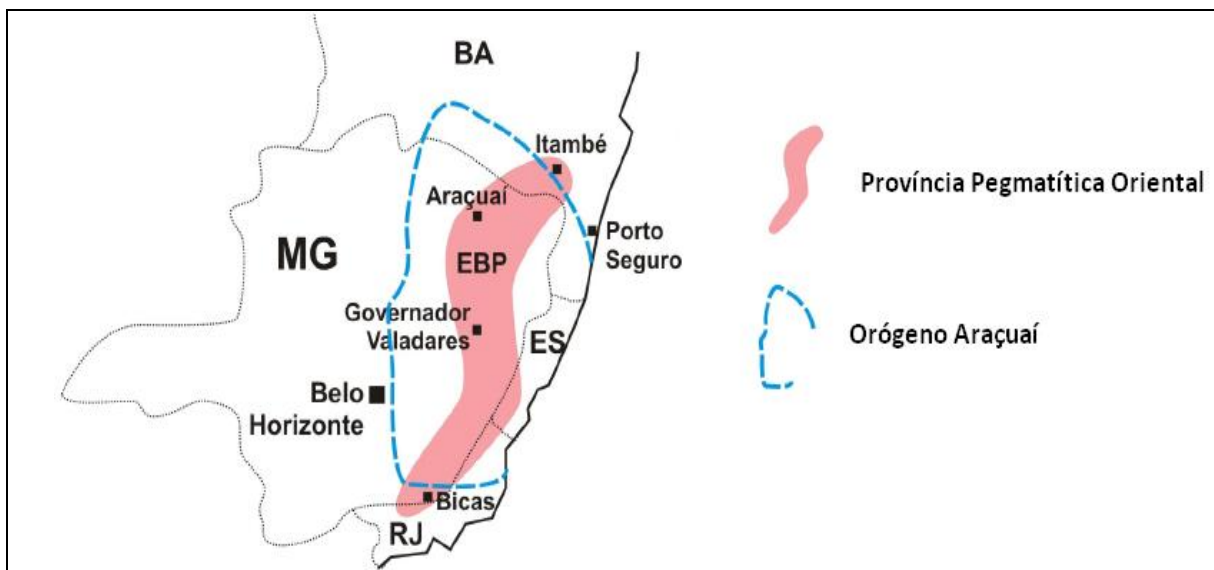


Figura 1.1 – Localização da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e sua relação com o Orógeno Araçuaí (adaptado de Pedrosa-Soares et al., 2009).

Além do interesse gemológico pelo espodumênio, seu conteúdo de lítio o tem tornado estrategicamente importante, em vista do forte aumento no consumo de baterias recarregáveis ao longo das últimas décadas. Os pegmatitos contribuem com 26 % dos recursos globais conhecidos de lítio, a maior parte vinda do espodumênio (Pistilli, 2013).

Uma outra característica que se destaca entre os espodumênios é a sua ampla diversidade de aspectos, conforme a Figura 1.2, os quais podem ter origem física e/ou química distintas.

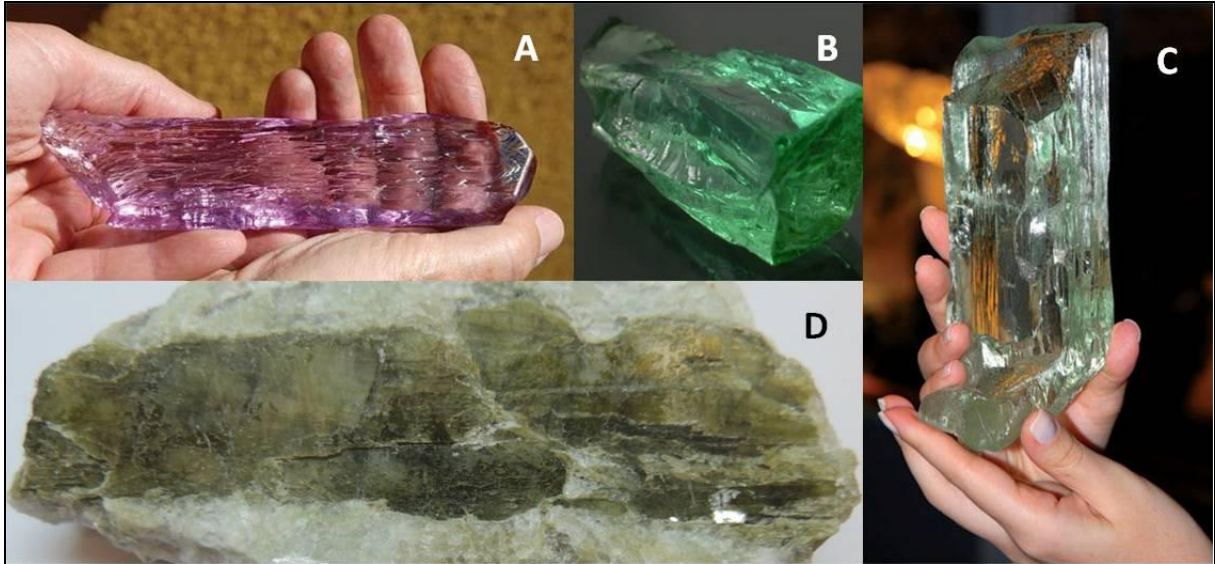


Figura 1.2 – Espodumênios com aspectos distintos. A. Variedade kunzita. B. Variedade hiddenita (norte-americana). C. Espodumênio verde amarelado brasileiro. D. Espodumênio industrial verde escuro.

1.1 Localização e acesso

As áreas de estudo estão localizadas nos municípios de Galiléia, Resplendor, Itambacuri, Araçuaí e Itinga, situados na porção leste-nordeste do estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil. Tomando em conta a capital mineira Belo Horizonte, as cidades de Galiléia, Resplendor, Itambacuri, Araçuaí e Itinga distam da primeira cerca de 386 km, 451 km, 420 km, 613 km e 643 km, respectivamente (Figura 1.3). O acesso à cidade de Araçuaí pode ser feito através das BR-040 e BR-367, passando pela cidade de Diamantina, ou também pela BR-381, passando pela cidade de Governador Valadares, e em seguida pelas BR-116 e BR-367. O acesso à cidade de Resplendor a partir da cidade de Governador Valadares é feito através da BR-259.

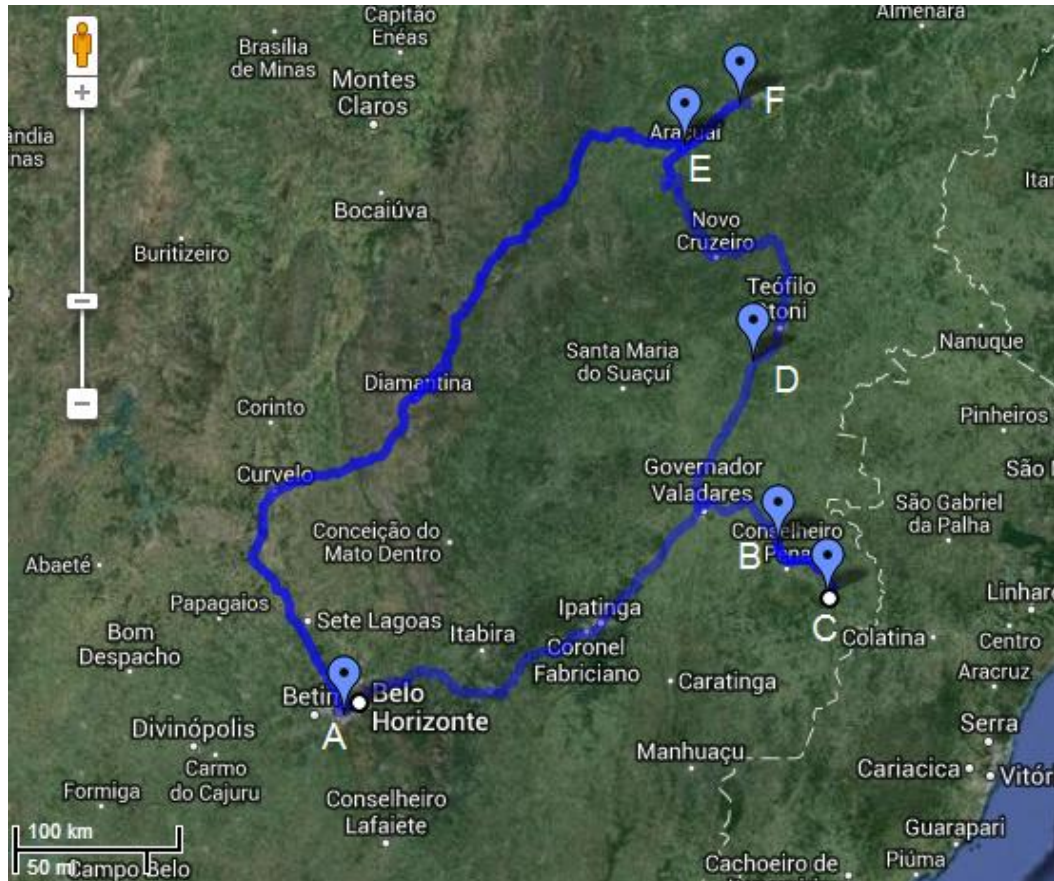


Figura 1.3 – Localização dos municípios onde se situam os depósitos estudados em relação a Belo Horizonte (ponto A). Galiléia (ponto B), Resplendor (ponto C), Itambacuri (ponto D), Araçuaí (ponto E) e Itinga (ponto F).

Os depósitos pegmatíticos estudados e seus respectivos municípios/coordenadas de localização encontram-se apresentados no Quadro 1.1.

Quadro 1.1 – Pegmatitos alvos deste projeto e os municípios em que se localizam.

Pegmatito/mina	Município	Coordenada (UTM)
Chapadinha	Itinga	192 759 / 8140180
Cachoeira	Araçuaí/Itinga	189 721 / 8142 540
Neves	Araçuaí	189 092 / 8115 472
Jairo Linguíça	Resplendor	265 217 / 7858 209
Sapucaia	Galiléia	235 900 / 7888 200
Urucum	Galiléia	241 136 / 7894 805
Santa Rosa	Itambacuri	193 635 / 8002 709

2 OBJETIVOS, RELEVÂNCIA E METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1 Objetivos

O propósito deste trabalho é estudar o mineral em vários corpos pegmatíticos em que ocorrem os diferentes tipos e variedades de espodumênio, com o fim de definir suas características, comparar tais ocorrências e discutir sobre suas causas de cor na Província Pegmatítica Oriental do Brasil.

De tal modo, o estudo pretendeu estabelecer uma relação entre o tipo de ambiente pegmatítico e a variedade de espodumênio presente nele, através de análises mineralógicas e químicas, além de caracterização dos pegmatitos, comparando-se sete áreas de ocorrências típicas. Buscou-se, ainda, conhecer as diferentes origens dos distintos aspectos do espodumênio na natureza, com base nos depósitos estudados.

Como os nióbio-tantalatos são minerais acessórios comuns em pegmatitos litiníferos, foram também estudadas amostras destes minerais, da mina da Cachoeira, com o objetivo de tentar definir alguma tendência geoquímica para Nb-tantalatos em pegmatitos ricos em Li.

2.2 Relevância

Considerando o largo aproveitamento do espodumênio como uma importante fonte de lítio, ele também tem utilidade como mineral gemológico. Apesar disso, pouco tem sido feito no sentido de ampliar o conhecimento das suas ocorrências e/ou jazidas conhecidas em Minas Gerais, conforme abordadas no presente estudo.

A caracterização e comparação dos pegmatitos mineralizados, extensão, formato e parageneses minerais identificadas foram de suma importância para alcançar os objetivos propostos. De tal modo, o estudo permitiu a obtenção de dados que auxiliaram no melhor entendimento sobre os depósitos de espodumênio no âmbito de toda a província mineral.

Além disso, apesar de não ser um mineral raro na natureza, existem poucos trabalhos relativos a seus aspectos químicos, o que também contribui para a relevância do presente trabalho. Ainda com respeito aos aspectos mineraloquímicos, este estudo possibilitou a

geração de dados sobre Nb-tantalatos e a identificação de um mineral nunca antes descrito na PPOB: ixiolita, colaborando com o conhecimento acerca destes minerais em Minas Gerais.

2.3 Metodologia de trabalho

A metodologia aplicada para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa foi dividida em estudos de campo e estudos laboratoriais. Os primeiros envolveram amostragem e caracterização geológica e mineralógica dos pegmatitos. Os segundos consistiram do estudo mineralógico dos pegmatitos e do espodumênio, além de feldspatos e Nb-tantalatos, através de análises com microsonda eletrônica e por espectroscopia de absorção ótica, bem como de ressonância paramagnética eletrônica (EPR), visando compreender as principais causas de cores presentes.

3 ESPODUMÊNIO EM PEGMATITOS – CARACTERÍSTICAS GERAIS

Neste capítulo, serão apresentados, de maneira geral, os aspectos históricos e a mineralogia do espodumênio, assim como sua ocorrência em pegmatitos, além de uma breve descrição do ambiente pegmatítico.

3.1 Aspectos históricos

O espodumênio foi descrito pela primeira vez como espécie mineral pelo mineralogista brasileiro José Bonifácio de Andrada e Silva. O primeiro espécime identificado por este cientista, porém, provinha do pegmatito de Utö, na Suécia (d'Andrada, 1800; in Mauthner, 2011).

O espodumênio é uma espécie mineral cujo nome é menos popular entre os consumidores de gemas e joias que os de suas variedades kunzita e hiddenita, sobretudo a primeira delas. O nome espodumênio tem origem no grego *σποδυμενος* (spodumenos) e significa “queimado até as cinzas”, em alusão à cor cinza dos espécimes não gemológicos primeiramente encontrados (Dias, 2002).

A kunzita foi descoberta em Pala, Califórnia, no início do século XX e deve seu nome a George Frederick Kunz (1856 – 1932), o mineralogista que primeiro a descreveu (Oliveira, 2009). Ela apresenta exuberantes matizes rosas (Figura 3.1), lilases e violetas, que se assemelham aos da alfazema, perfeitamente transparentes e de tonalidades claras, ou às vezes ligeiramente azuladas (Silveira, 2004).



Figura 3.1 – Amostra de espodumênio variedade kunzita do Pegmatito Córrego do Urucum, Galiléia (Cornejo & Bartorelli, 2010).

A atraente e rara hiddenita (Figura 3.2), igualmente transparente, possui uma coloração verde-esmeralda intensa, possivelmente devida a impurezas de cromo, sendo sua designação uma homenagem a William E. Hidden (1853 – 1918), seu descobridor e também um eminente colecionador de minerais em seu tempo (Silveira, 2004).



Figura 3.2 – Amostra de espodumênio variedade hiddenita do Afeganistão (<http://www.minedirect.com/>).

Embora o espodumênio (industrial) seja conhecido pelos mineralogistas há mais de 200 anos, suas variedades gemológicas parecem ter sido determinadas apenas por volta de 1877. Nesta data, foi reportada a descoberta de espodumênio amarelo transparente no Estado de Minas Gerais. Desde então, outros “caldeirões” com espodumênio gemológico foram encontrados no estado. A principal fonte de kunzita rosa-azulada, descoberta algum tempo antes de 1926, localizava-se na Barra do Cuieté (às margens do Rio Doce, próximo a Conselheiro Pena). Cristais amarelos e verdes também foram encontrados nesta localidade (Figura 3.3); os verdes foram classificados localmente como hiddenitas, porém erroneamente, uma vez que sua coloração não é comprovadamente devida ao cromo (Webster, 1975). Não existem nomes especiais, aceitos pela comunidade mineralógica, para designar as variedades amarelas e verde-amareladas (Hurlbut & Switzer, 1991), porém alguns autores (Sinkankas, 1959; Cornejo & Bartorelli, 2010) utilizam o termo trifana, que foi o nome dado ao espodumênio pelo mineralogista francês Haiüy, em 1801, em alusão às três direções nas quais o cristal se quebra (Mauthner, 2011).

Ao contrário de muitas gemas coradas, que são lavradas principalmente em depósitos secundários, o espodumênio é mais comumente extraído de suas fontes primárias, os

pegmatitos graníticos. Os principais países produtores de kunzita e hiddenita são, atualmente, Afeganistão, Brasil, Madagascar, Myanmar, Sri Lanka e Estados Unidos (Silveira, 2004).



Figura 3.3 – Amostra de espadumênio verde pálido da Lavra do Jairo Lingüiça, Resplendor, Minas Gerais (Cornejo & Bartorelli, 2010).

A produção brasileira de espadumênio tem se mostrado irregular nos últimos anos, sendo que os principais depósitos estão localizados no Estado de Minas Gerais, nos municípios de Galiléia, Conselheiro Pena, Resplendor, Água Boa e na localidade de Barra do Cuieté (Silveira, 2004).

3.2 Mineralogia, cristaliquímica e gemologia

O espadumênio é um silicato de lítio e alumínio do grupo dos piroxênios, incolor em seu estado puro. Sua fórmula química é $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, e pode apresentar-se nas cores: cinza, rosa a roxo azulado, verde, amarelo, incolor, azul (muito raro); as variedades coloridas tipicamente possuem tonalidades mais claras dessas cores (Instituto Brasileiro de Gemas & Metais Preciosos - IBGM, 2009). Cristaliza-se no sistema monoclinico (classe de simetria $2/m$ e grupo espacial $C2/c$) e ocorre em característicos cristais prismáticos alongados, com frequência paralelamente a $\{100\}$ (Klein & Dutrow, 2012), com terminações achatadas, muitas vezes de tamanhos consideráveis; possui seção normalmente quadrada ou retangular e

faces longitudinais estriadas, com numerosas figuras de corrosão na forma de triângulos escalenos (Silveira, 2004). Possui clivagem perfeita segundo {110} (Klein & Dutrow, 2012).

A dureza desse mineral varia de 6,5 a 7 e o peso específico de 3,15 a 3,20 g/cm³ (Klein & Dutrow, 2012). Suas faces prismáticas formam ângulos de 87° e 93° entre si, o que faz com que seja uma gema de difícil lapidação. Apresenta fratura de plana a plano-fibrosa, brilho vítreo (nacarado nas superfícies de clivagem), sendo que a kunzita geralmente exibe fluorescência de moderada a forte de cor alaranjada a rosa dourada à luz ultravioleta, mais intensa sob comprimentos de onda longos (Silveira, 2004). Adicionalmente, pode apresentar fosforescência e outras características físicas especiais (Fujii & Isotani, 1988; Isotani et al., 1990; Isotani et al., 1991).

O espodumênio possui índices de refração entre 1,660-1,676 ($\pm 0,005$) (Hurlbut & Switzer, 1991), e apresenta sinal ótico biaxial positivo, birrefringência aproximadamente constante de 0,015 e dispersão de 0,017 (Webster, 1975). Lapidado, pode ser confundido com: turmalina, peridoto, berilo, sillimanita, euclásio, fenacita e kornepina (IBGM, 2009), além de ambligonita-montebrazita. O espodumênio forma tipicamente cristais euédricos, tabulares ou placóides, de tamanho grande a gigante, de cor branca, bege, ou raramente rosa claro ou verde claro (London, 2008). Estes cristais provavelmente são de origem primária, isto é, parecem ter cristalizado diretamente de fluidos magmáticos ou hidrossalinos.

Segundo Černý (1982), as variedades gemológicas coloridas de espodumênio usualmente cristalizam em cavidades a partir de soluções hidrotermais e contêm quantidades relativamente altas de Fe, Mn, Cr e outros metais de transição. Tais cavidades, segundo Tornøe (1997), se caracterizam por estarem ligadas espacial e geneticamente a zonas de circulação de fluidos, tais como fraturas e zonas de porosidade, pelas quais são transferidos calor e diversos componentes químicos ao sistema.

As variedades kunzita e a hiddenita apresentam pleocroísmo intenso, perceptível até mesmo à vista desarmada, pela simples rotação dos exemplares, principalmente os mais saturados. O pleocroísmo da kunzita é de moderado a forte, de rosa a roxo claro e incolor, enquanto o da hiddenita é moderado, verde azulado a verde amarelado (IBGM, 2009). A cor mais intensa corresponde à direção paralela à do comprimento do cristal e, para melhor

aproveitar o efeito ao lapidar-se a gema, deve-se orientar a faceta principal (mesa) perpendicularmente a esta direção.

Por apresentar-se sempre em tonalidades claras, o espodumênio costuma ser lapidado com a maior profundidade possível para obter-se a máxima retenção da cor, procurando-se, contudo, resguardar as proporções esteticamente corretas, o que resulta em gemas de rara beleza (Silveira, 2004). As variedades gemológicas perdem a cor quando expostas à luz por tempo prolongado (IBGM, 2009). O espodumênio é um mineral alocromático, isto é, deve sua cor a impurezas químicas contidas no material (Dias, 2002).

3.3 O lítio e seus usos

O elemento lítio foi descoberto em 1817 pelo químico sueco Johann August Arfvedson, e sua exploração comercial iniciou-se nos Estados Unidos da América, em 1898, em minas situadas no Estado de Dakota do Sul (Romeiro, 1998).

O lítio é um metal leve, constituindo o mais eletropositivo dos elementos metálicos. Tem brilho prateado e não ocorre livre na natureza e, mesmo combinado, está longe de ser abundante. Na crosta terrestre, encontra-se bastante distribuído, sendo-lhe atribuída uma percentagem da ordem de 0,004%. Os compostos de lítio são obtidos principalmente dos minerais: espodumênio, lepidolita, ambligonita e petalita. Atualmente, as principais fontes de lítio são depósitos de evaporitos (originados de salmouras com alto teor de lítio), como os encontrados nos desertos de sais do Chile, Argentina, Bolívia, China e Tibet (Pistilli, 2013; Braga & Sampaio, 2008). Esses depósitos de salmouras antigas representam cerca de 66% dos recursos globais de lítio, e a produção atual se concentra em minas continentais na América Latina, principalmente por apresentar custos de produção mais baixos do que a extração em rochas (pegmatitos) (Pistilli, 2013).

O hidróxido e o carbonato de lítio são as principais formas em que o lítio é usado industrialmente. São considerados como derivados mútuos, pela carbonatação e descarbonatação, respectivamente. O hidróxido e o carbonato de lítio são obtidos diretamente dos minerais e salmouras ricos em lítio. Já os outros compostos de lítio são geralmente obtidos pela reação dos mesmos com o ácido do sal desejado. Assim, pelo tratamento

adequado, o hidróxido e o carbonato são as matérias básicas para a preparação de outros compostos e do metal (Braga & Sampaio, 2008).

Os principais usos do lítio, seja na forma de um concentrado mineral ou na forma de um produto químico (carbonato, hidróxido e derivados), incluem a utilização na fabricação de alumínio primário, a indústria de cerâmicas e vidros, a fabricação de fritas, a produção de graxas especiais, a produção de baterias e acumuladores, a utilização em sistemas de ar condicionado e desumidificadores e a produção de fármacos (Braga & Sampaio, 2008).

3.4 O ambiente pegmatítico

Os pegmatitos têm atraído o interesse de geocientistas por mais de um século, tanto pela diversidade das espécies mineralógicas presentes, quanto pela beleza e raridade de alguns de seus exemplares.

A definição de pegmatito, dada por London (2008), é a de uma rocha essencialmente ígnea, de composição comumente granítica, distinguida das outras rochas ígneas pelo seu tamanho de grão extremamente grosso mas variável, ou pela abundância de cristais com hábito esqueletal, gráfico (Figura 3.4), ou outro hábito de crescimento direcional. A textura gráfica é única aos pegmatitos, e a partir dela foi designado o próprio termo pegmatito (London & Kontak, 2012).

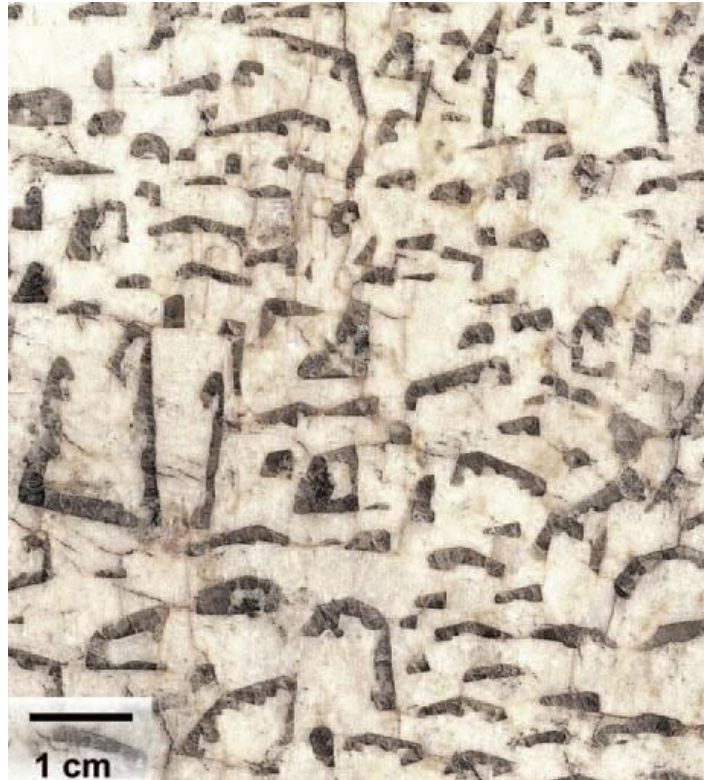


Figura 3.4 – Aspecto geral de um granito gráfico: quartzo (cinza) em microclínio (branco) (London & Kontak, 2012).

A maioria dos pegmatitos são corpos pequenos, com dimensões métricas e estrutura interna complexa, que formam segregações dentro de grandes massas de rocha granítica (Figura 3.5), ocorrendo também como diques, *sills* ou lentes nas rochas hospedeiras, sejam graníticas ou metamórficas (London, 2008; London & Kontak, 2012). As segregações usualmente aparecem como massas nitidamente delimitadas dentro de suas encaixantes ígneas de mesma composição geral. A transição de diques para lentes é reflexo de mudanças na competência da rocha hospedeira, devido a alterações composicionais (de ígneas a xistosas ou gnáissicas) (London, 2008).



Figura 3.5 – Modelo geral de segregação pegmatítica dentro de um granito (London & Kontak, 2012).

Embora não tenha surgido nenhum modelo universalmente aceito para a gênese de pegmatitos que explique satisfatoriamente todas as diversas características dessas rochas, a gênese a partir de fusões residuais derivadas da cristalização de plútons graníticos é a mais difundida pela maioria dos pesquisadores. Os componentes incompatíveis e elementos “fluxantes”, voláteis e raros se concentram nessas fusões residuais.

A presença de elementos “fluxantes” e voláteis abaixa a temperatura de cristalização, diminui as taxas de nucleação, polimerização e viscosidade da fusão, e aumenta as taxas de difusão e a solubilidade, o que é considerado primordial para o desenvolvimento de cristais gigantes e texturas pegmatíticas (Simmons & Webber, 2008). O enriquecimento do fluido em elementos incompatíveis, substâncias voláteis e metais raros (Be, Nb, Ta, Li, Rb, Ce e Ga) reflete na mineralogia única dos pegmatitos, como a presença de gemas, minerais raros e minerais industriais, o que possibilita a exploração econômica desta rocha.

Levando em consideração a frequência de descobertas no campo, a grande maioria dos pegmatitos possui composição granítica, embora pegmatitos também sejam originados de

rochas ultramáficas, máficas, sieníticas e carbonatíticas, refletindo sua composição (London, 2008). Todos estes últimos, no entanto, não geram jazidas economicamente exploráveis.

Houve várias tentativas de classificação de pegmatitos graníticos ao longo do século passado, tendo apresentado taxas de êxito e aplicabilidade variáveis. A estrutura interna, as relações paragenéticas, a composição química global, os aspectos petrogenéticos, a natureza do ambiente de crescimento e as características geoquímicas foram todos utilizados como parâmetros de classificação. Todavia, tais esquemas foram limitados pelo nível de compreensão destes parâmetros em sua aplicação, e pela negligência das diferenças do meio geológico (Černý & Ercit, 2005).

A classificação para pegmatitos criada por Landes (1933) foi a primeira a ser amplamente utilizada nos Estados Unidos. Neste esquema, era feita a distinção entre pegmatitos simples, tomados como ígneos devido à sua similaridade com rochas plutônicas comuns, e pegmatitos complexos, contendo uma abundância significativa de minerais raros, atribuídos à substituição hidrotermal do pegmatito pré-existente (London, 2008). Devido ao fato de pegmatitos serem definidos mais pela sua textura do que pela composição, London (2008) considera o termo “simples” mal empregado neste contexto, e sugere o uso do termo “comum” para pegmatitos de composição semelhante à de outras rochas graníticas.

Devido à distribuição da mineralogia presente, os pegmatitos podem ser ainda não zonados ou zonados. Os não-zonados, também denominados homogêneos, são constituídos essencialmente por quartzo, feldspato potássico e mica, essencialmente muscovita, com os minerais distribuindo-se de forma regular ao longo do corpo, em cristais que variam de centimétricos a decimétricos. No entanto, podem apresentar turmalina, apatita, berilo, granada e topázio como minerais acessórios, que em geral apresentam-se de maneira disseminada. Corpos desse tipo possuem formato tabular ou dômico e seu contato com a rocha encaixante é brusco (Vidal & Neto, 2005).

Já os pegmatitos zonados ou heterogêneos são compostos por 4 zonas distintas (Figura 3.6), que se diferem pela paragénese mineral e/ou pela granulometria de cada zona (Jahns, 1955; in Vidal & Neto, 2005), além dos corpos de substituição:

- a) **Zona 1**, marginal ou de borda: é a zona mais externa e mostra transição com a rocha encaixante. É constituída essencialmente por quartzo, feldspato e grandes placas de muscovita, podendo ainda haver presença de cassiterita e granada;
- b) **Zona 2**, mural ou de parede: assemelha-se a um pegmatito homogêneo em sua granulação, composição e estrutura, ocupando o maior volume do corpo, passando gradativamente para a Zona 3;
- c) **Zona 3** ou intermediária: esta zona é destacada pela presença de minerais de minério como ambligonita, berilo, columbita-tantalita, espodumênio, dentre outros, além de feldspatos em cristais gigantes;
- d) **Zona 4** ou axial: é constituída por um núcleo de quartzo maciço, de cores variadas, de forma regular, irregular ou disseminado em grandes blocos, dispostos simetricamente ou não em relação às outras zonas. Os minerais acessórios presentes nesta zona são encontrados preferencialmente no contato com a Zona 3.
- e) **Corpos de substituição**: são unidades formadas primariamente por substituição de pegmatito preexistente, com ou sem controle estrutural óbvio (Correia Neves, 1981). Também são conhecidos como *pockets* ou ainda, na linguagem garimpeira, como “caldeirões”.

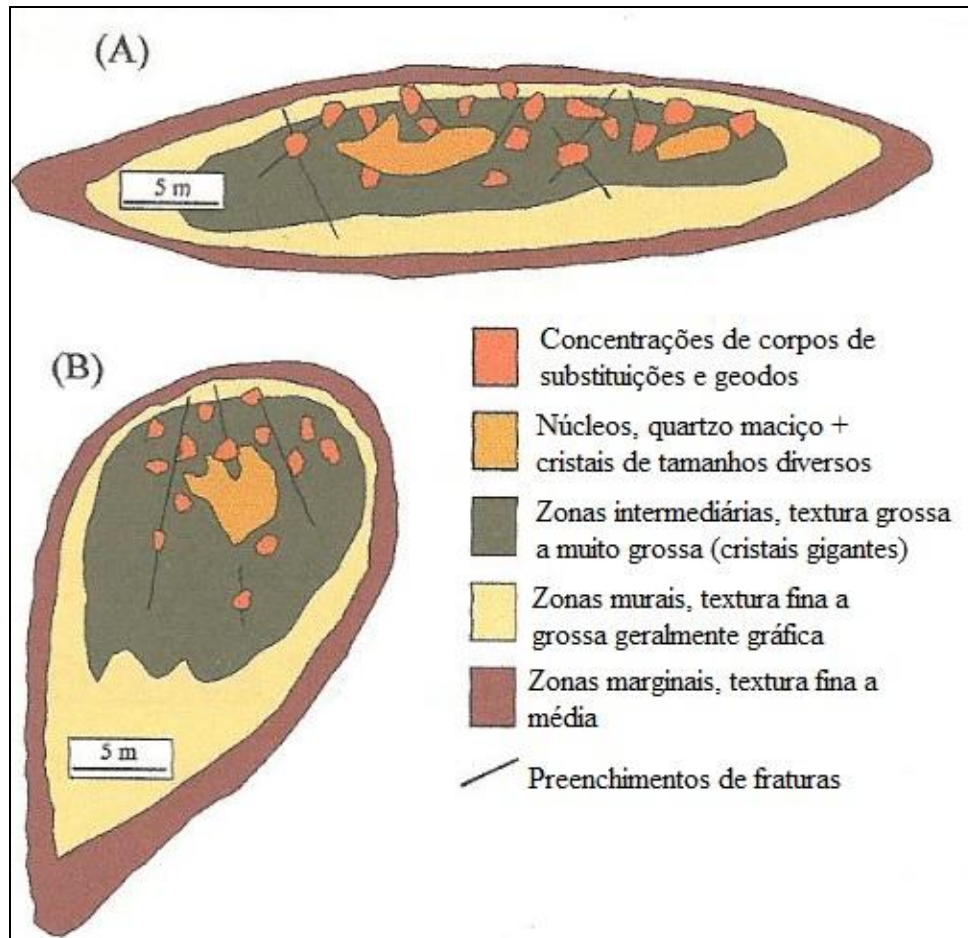


Figura 3.6 – Modelos de estruturas assimétricas, em corte transversal, de pegmatitos zonados (modificado de Romeiro, 1998).

Černý (1991) propôs duas “famílias” petrogenéticas de pegmatitos, abreviadas como “LCT” e “NYF”, correspondendo ao enriquecimento em elementos produzido pelo fracionamento em grupos pegmatíticos quimicamente distintos. O tipo LCT significa lítio – céσιο – tântalo, um enriquecimento característico encontrado na maior parte, mas talvez não exclusivamente, em granitos do “tipo-S” originados de rochas metassedimentares ricas em muscovita (London, 1995; in London, 2008). A Figura 3.7 mostra o padrão de enriquecimento dos pegmatitos LCT de acordo com o distanciamento da área fonte. O tipo NYF representa nióbio – ítrio – flúor, uma suíte característica de elementos químicos nos granitos e pegmatitos geralmente denominados “tipo-A”, de origem anorogênica, também conhecidos como granitos “interiores” (London, 2008).

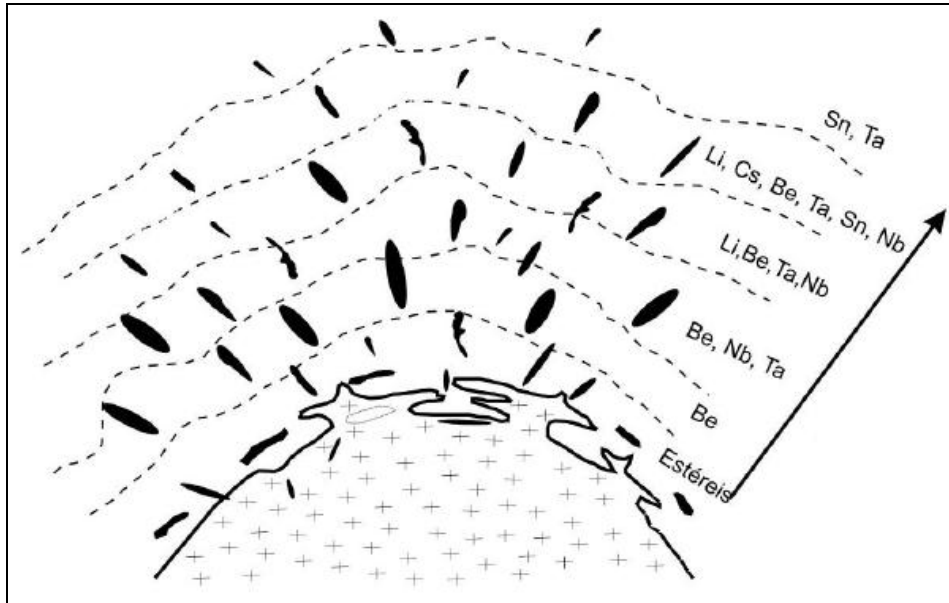


Figura 3.7 – Zonamento de pegmatitos LCT. A seta indica o distanciamento do granito fonte (Černý, 1991).

Černý & Ercit (2005) distinguem cinco classes de pegmatitos graníticos, baseadas nas condições de pressão (e, em parte, temperatura) que caracterizam as suítes de suas rochas hospedeiras (Figura 3.8). Tais condições de P e T devem ser consideradas estimativas máximas para o ambiente durante o posicionamento dos pegmatitos, pois caracterizam o pico do metamorfismo das encaixantes, o qual habitualmente antecede substancialmente as intrusões da fusão formadora dessas rochas.

Em algumas classes, o próximo passo para suas divisões leva a subclasses, distinguidas por diferenças fundamentais em sua assinatura geoquímica. Em seguida, a subdivisão leva a tipos e subtipos de pegmatitos, marcada por diferenças significantes na paragênese mineral, assinatura geoquímica, condições de consolidação, ou ainda uma combinação destes aspectos (Černý & Ercit, 2005).

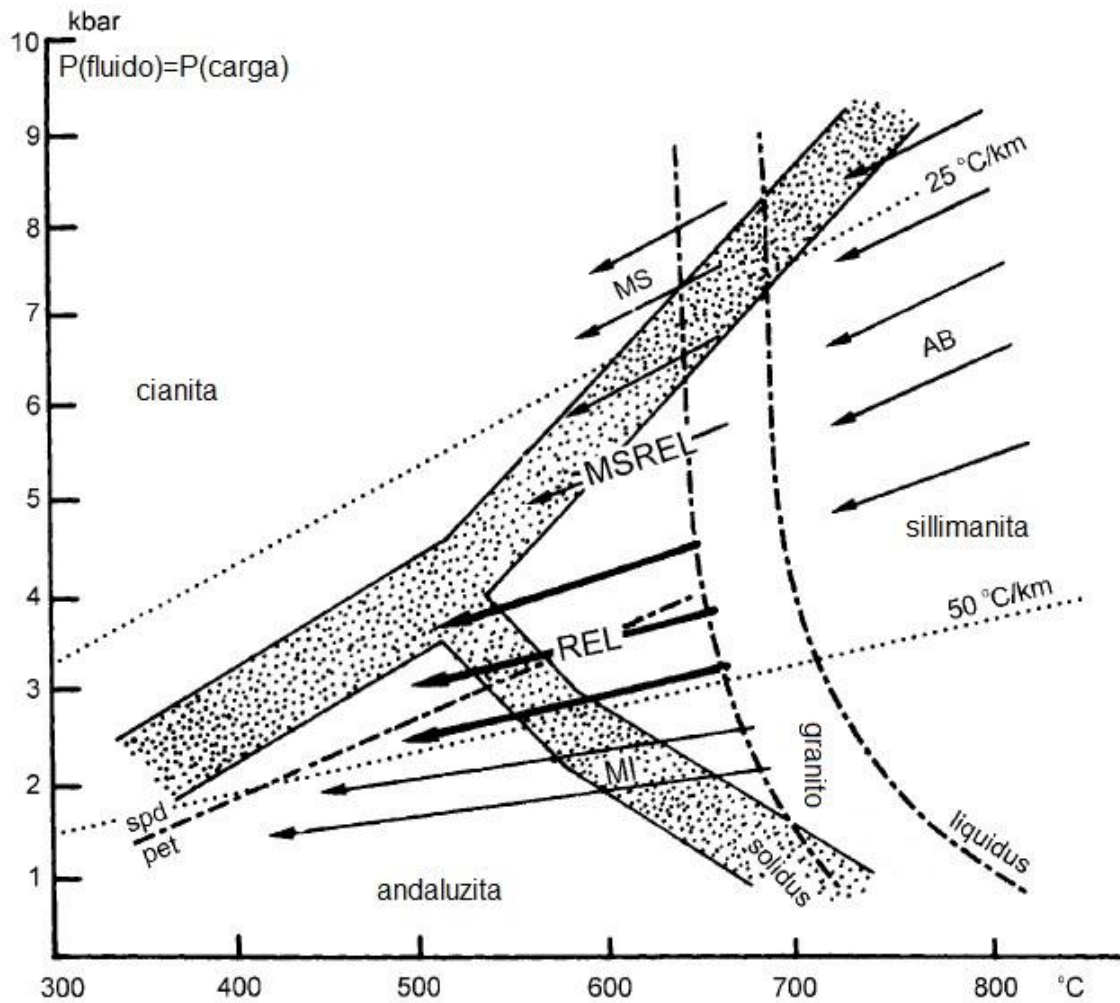


Figura 3.8 – Campos de P e T esquemáticos das rochas encaixantes regionais que abrigam pegmatitos. Classes - abissal (AB), muscovita (MS), muscovita – elementos raros (MSREL), elementos raros (REL) e mirolítica (MI). As setas indicam tendências regionais de fracionamento nos pegmatitos, referentes aos graus metamórficos das rochas encaixantes. As populações MS e MSREL, assim como as de pegmatitos REL e MI, tendem a ser, em alguns casos, transicionais entre si. Os gradientes de 25°C/km e 50°C/km correspondem à média das fácies-séries metamórficas Barrowiana e Abukuma, respectivamente (modificado de Černý & Ercit, 2005).

No Quadro 3.1, estão representadas as classes de pegmatitos graníticos designadas por Černý & Ercit (2005), com suas respectivas subclasses, tipos e subtipos. Segue-se uma breve descrição de cada classe, sendo que apenas as subclasses, tipos ou subtipos mais relevantes a este trabalho foram abordados.

Quadro 3.1 – Principais subdivisões da classificação geológica, paragenética e geoquímica de pegmatitos graníticos (Černý & Ercit, 2005), ordenadas segundo as condições de pressão e temperatura. *ETRp – elemento terra-rara pesado; **ETRI – elemento terra-rara leve.

Classe	Subclasse	Tipo	Subtipo
Abissal (AB)	AB-ETRp*		
	AB-ETRI**		
	AB-U		
	AB-BBe		
Muscovita (MS)			
Muscovita - elementos raros (MSELR)	MSELR-ETR		
	MSELR-Li		
Elementos raros (ELR)	ELR-ETR	Allanita-monazita	
		Euxenita	
		Gadolinita	
	ELR-Li	Berilo	Berilo-columbita
			Berilo-columbita-fosfato
		Complexo	Espodumênio
			Petalita
			Lepidolita
			Elbaíta
			Amblygonita
Albita-espodumênio			
Albita			
Miarolítica (MI)	MI-ETR	Topázio-berilo	
		Gadolinita-fergusonita	
	MI-Li	Berilo-topázio	
		MI-espodumênio	
		MI-petalita	
		MI-lepidolita	

Os pegmatitos da classe abissal (AB) ocorrem na maior parte da faixa de P e T da fácies granulito, excluídos os extremos de maior pressão. A maioria destes pegmatitos corresponde a produtos de fusão parcial ou reequilíbrio metamórfico. As mineralizações, amplamente restritas a uma estreita faixa de HFSE (*high-field-strength elements* – U, Th, Y, ETR, Nb e Zr), são comumente esparsas e poucas vezes econômicas. Quatro subclasses desses pegmatitos podem ser distinguidas, três delas caracterizadas por extremos nas relações geoquímicas de U e Th em relação ao Y: ETRI, ETRp e Nb. A quarta classe foi considerada provisória, englobando pegmatitos enriquecidos em B e Be (Černý & Ercit, 2005).

Os pegmatitos da classe muscovita (MS) são amplamente concordantes com suas rochas encaixantes da fácies anfíbolito de altas pressões, e em parte deformados com elas. São tipicamente estéreis, contendo feldspato de grau cerâmico, quartzo e mica industrial. A mineralogia simples de silicatos acessórios e a falta de mineralizações na maioria das ocorrências dificultam qualquer subdivisão significativa desta classe (Černý & Ercit, 2005).

Os pegmatitos da classe muscovita-elementos raros (MSELR) ocorrem tipicamente hospedados em rochas de ambiente metamórfico intermediário, em relação às condições metamórficas das encaixantes das classes muscovita e elementos raros. A maioria destes pegmatitos é discordante à foliação metamórfica de suas rochas encaixantes, e ocasionalmente mostra zonamento espacial com relação aos granitos parentais. Tais pegmatitos contêm tanto muscovita de alta qualidade e potencial econômico, quanto concentrações de minerais de elementos raros que em alguns casos podem ser econômicos (por exemplo, berilo, cassiterita, minerais do grupo da columbita, óxidos de ETR-Nb-U e silicatos de lítio) (Černý & Ercit, 2005).

A classe dos pegmatitos a elementos raros (ELR) engloba corpos gerados pela diferenciação de plútons graníticos, em geral posicionados a profundidades intermediárias a relativamente rasas, e marcados por uma tendência a acumular concentrações econômicas de elementos litófilos raros nos tipos mais fracionados. Cerny & Ercit (2005) dividem esta classe em duas subclasses: ELR-ETR e ELR-Li. Os membros da subclasse ELR-ETR são derivados principalmente de granitos metaluminosos a peraluminosos, pós- a anorogênicos, a profundidades crustais variáveis, amplamente (mas não exclusivamente) em cenários extensionais.

Diferentemente da primeira, a subclasse ELR-Li abrange pegmatitos posicionados em rochas encaixantes de fácies xisto verde superior a anfíbolito de baixa pressão da série metamórfica do tipo Abukuma, e diferenciados predominantemente de granitos peraluminosos sin- a tardi-orogênicos, predominantemente (mas não exclusivamente) em regimes orogênicos compressoriais. Os pegmatitos ELR-Li constituem a mais diversificada subclasse em todo o espectro de classificação, refletindo uma diversidade de elementos raros e condições de solidificação. Esta subclasse é, portanto, ainda dividida em tipos e subtipos (Černý & Ercit, 2005).

O subtipo espodumênio é a categoria mais comum dos pegmatitos complexos, cristalizados a pressões relativamente altas (entre 3 a 4 kbar). O tipo albita-espodumênio de pegmatitos complexos é composicionalmente relacionado ao subtipo espodumênio, e se consolida às mesmas pressões relativamente elevadas. No entanto, este tipo difere em sua composição geral devido a um predomínio substancial de albita e quartzo sobre feldspato potássico, e a uma concentração de lítio no mais elevado nível estabelecido por experimentos

de enriquecimento magmático (~2,0 % em peso como óxido). A diferença mais notável está no zonamento simples dos corpos individuais, se aproximando de uma textura homogênea, e na orientação fortemente preferencial de cristais de espodumênio e feldspato potássico, subnormal a oblíqua à atitude do corpo pegmatítico (Černý & Ercit, 2005).

As cavidades miarolíticas primárias são resultantes do aprisionamento de bolhas de uma fase gasosa no corpo pegmatítico parental. Elas existem em geral todas as categorias de pegmatitos graníticos, mas na maioria das vezes em tamanho e número insignificantes. No entanto, duas categorias de pegmatitos encaixados a nível raso com elevado número de cavidades primárias foram especificamente designadas, e tratadas por Černý & Ercit (2005) como subclasses separadas de uma classe miarolítica (MI) redefinida. São elas: MI-ETR e MI-Li.

3.5 Lítio em pegmatitos

Pegmatitos graníticos ricos em lítio constituem usualmente uma pequena proporção (em geral 1-2 %) de todos os pegmatitos expostos em um determinado distrito; a maioria dos distritos pegmatíticos contém, no entanto, no mínimo alguns pegmatitos ricos em lítio. Tais pegmatitos são os mais afastados de sua fonte termal ou magmática entre todos os pegmatitos gerados a partir dela, e usualmente intrudem terrenos metamórficos que registraram elevados gradientes termais (Černý, 1982).

A maioria dos pegmatitos contendo lítio são nitidamente zonados tanto em sua granulometria quanto em sua mineralogia, e os minerais de lítio se concentram geralmente em zonas interiores ou núcleos de granulometrias extremamente grossas. Entretanto, pegmatitos não zonados contendo espodumênio também são bastante comuns (Černý, 1982).

Espodumênio (α -LiAlSi₂O₆) e petalita (LiAlSi₄O₁₀) são os dois minerais de lítio mais importantes que ocorrem nos pegmatitos graníticos, em estágio primário, tanto no Brasil como em outros depósitos da África e Estados Unidos (London, 2008). Entretanto, em regra, esses dois minerais excluem-se na natureza; o primeiro, mais denso, aparece a maiores temperaturas e pressões, enquanto a petalita ocorre em sistemas formados a maiores temperaturas porém sob pressões mais baixas.

As reações entre os aluminossilicatos de lítio estão vinculados apenas à sílica (SiO_2), portanto, quando a saturação em sílica for mantida pelo quartzo, as relações de estabilidade entre os aluminossilicatos de lítio mais comuns (petalita, espodumênio e eucryptita) serão função apenas da pressão e da temperatura (London, 2008).

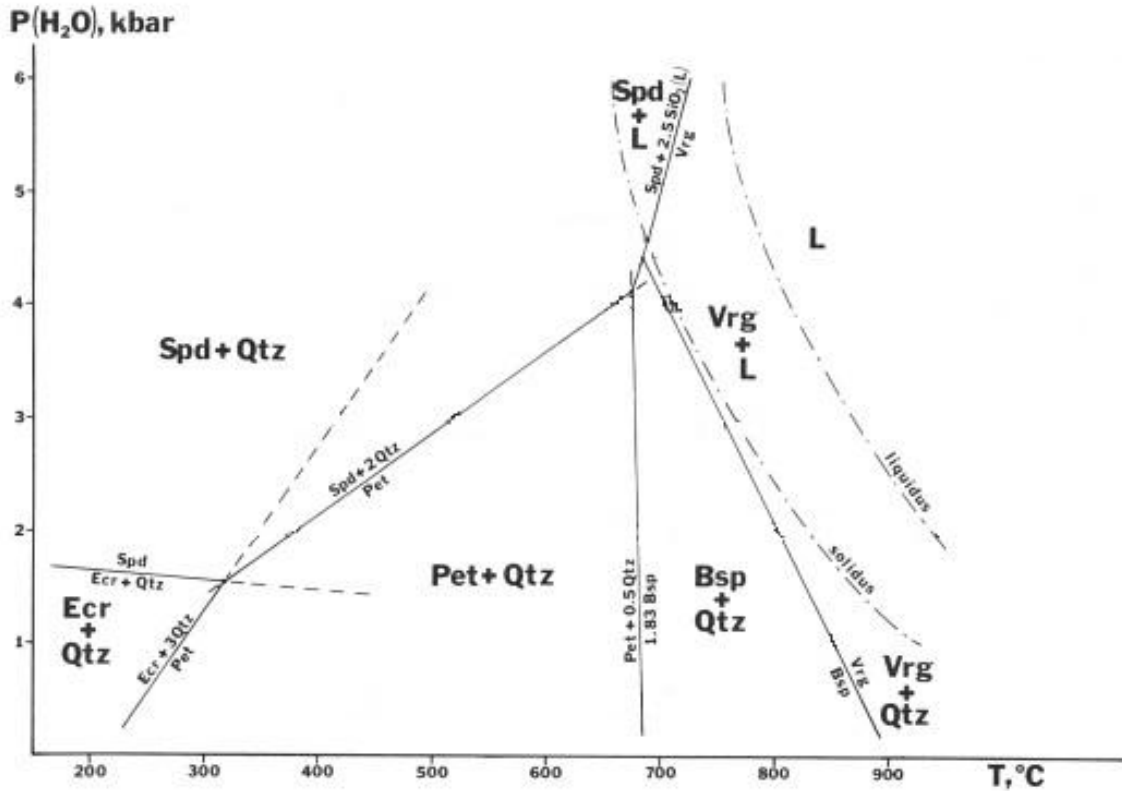


Figura 3.9 – Diagrama de fases experimental dos aluminossilicatos de lítio (modificado de London, 1990). Abreviações: Pet = petalita; Spd = espodumênio; Ecr = eucryptita; Bsp = β -espodumênio; Vrg = virgilita; Qtz = quartzo; e L = fusão.

As relações de estabilidade entre os aluminossilicatos de lítio (Figura 3.9), em condições de saturação em quartzo no sistema $\text{LiAlSiO}_4\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$, foram definidas por London & Burt (1982a,b), e determinadas experimentalmente por London (1984). Reações de espodumênio ou petalita se transformando em virgilita ou β -espodumênio (não encontrado na natureza) limitam a cristalização de aluminossilicatos de lítio em pegmatitos a temperaturas abaixo de aproximadamente 700°C a qualquer pressão (London, 2008).

Os principais minerais de lítio em pegmatitos e suas respectivas fórmulas químicas são apresentados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Principais minerais de lítio em pegmatitos.

Mineral	Fórmula química
Espodumênio	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$
Petalita	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$
Eucryptita	LiAlSiO_4
Virgilita	$\text{Li}_x\text{Al}_x\text{Si}_{3-x}\text{O}_6$
Lepidolita	$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$
Montebrasita	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{OH},\text{F})$
Ambligonita	$\text{LiAl}(\text{PO}_4)(\text{F},\text{OH})$
Trifilita	$\text{Li}(\text{Fe},\text{Mn})\text{PO}_4$

4 A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL DO BRASIL – ASPECTOS GEOLÓGICOS

No Brasil, os minerais de lítio, incluindo o espodumênio, ocorrem especialmente em pegmatitos heterogêneos, na zona feldspática de vários depósitos da Província Pegmatítica Oriental Brasileira (Dias, 2002).

As províncias pegmatíticas brasileiras foram definidas por Paiva (1946), baseadas na distribuição geográfica dos agrupamentos de corpos dessas rochas ao longo do território nacional. A Província Pegmatítica Oriental abrange os estados da Bahia, de Minas Gerais, do Espírito Santo e Rio de Janeiro, em uma superfície de aproximadamente 150.000 km². No entanto, mais de 90% desta área está localizada na parte leste do estado de Minas Gerais, especificamente na unidade geotectônica denominada Orógeno Araçuaí (Figura 4.1). Rochas graníticas, de idades que variam do final do Neoproterozóico até o Cambro-Ordoviciano, incluindo pegmatitos, cobrem em torno de 1/3 desta região (Pedrosa-Soares et al., 2009).

Os corpos pegmatíticos desta grande região são relacionados principalmente ao magmatismo granítico desenvolvido durante o Evento Brasileiro, entre 630 Ma e 490 Ma, ao longo do Orógeno Araçuaí (Dardenne & Schobbenhaus, 2003; Pedrosa-Soares et al., 2009). Eles podem ser de dois tipos: anatéticos (diretamente formados da fusão parcial das rochas regionais) ou residuais (fusões silicatadas resultantes da cristalização fracionada dos granitos geradores) (Correia Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 2009).

Levando em conta as relações de campo, os atributos geoquímicos e petrológicos, além de dados geocronológicos U-Pb em zircões, as rochas graníticas do orógeno Araçuaí foram agrupadas em cinco diferentes supersuítas, designadas de G1, G2, G3, G4 e G5 (Pedrosa-Soares et al., 2001b, 2008; in Pedrosa-Soares et al., 2009). Com relação aos estágios de desenvolvimento do orógeno Araçuaí, a supersuíte G1 é pré-colisional (630-585 Ma), G2 é sin-colisional (585-560 Ma), G3 é tardi- a pós-colisional (545-520 Ma), e G4 e G5 são pós-colisionais (535-490 Ma) (Pedrosa-Soares et al., 2009, 2011).

A distribuição geográfica dos tipos de pegmatitos, bem como suas relações com as rochas encaixantes e os granitos parentais, assim como suas idades e principais recursos minerais, levaram à distinção de onze distritos pegmatíticos no Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares et al., 2009). Tais distritos são detalhados no Quadro 4.1, e a Figura 4.2 mostra a localização dos sete principais distritos em Minas Gerais.

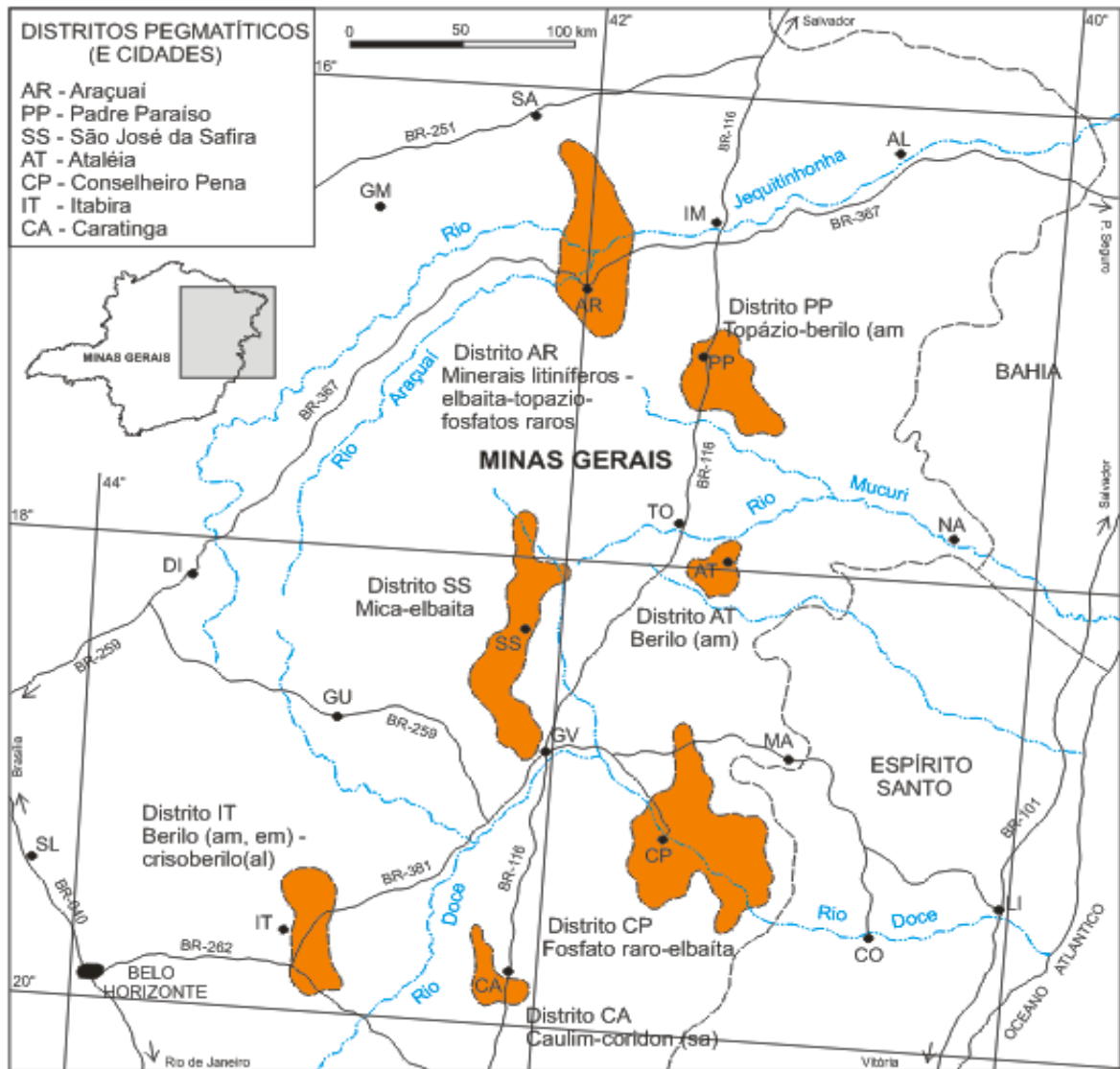


Figura 4.2 – Principais distritos pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil no Estado de Minas Gerais. Outras cidades: SL, Sete Lagoas; DI, Diamantina; GU, Guanhanês; GM, Grão Mogol; SA, Salinas; IM, Itabira; AL, Almenara; TO, Teófilo Otoni; NA, Nanuque; MA, Mantena; CO, Colatina; LI, Linhares (modificado de Pedrosa-Soares et al., 2009).

Quadro 4.1 – Distritos Pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil no Orógeno Araçuai. Referências de idades: a - Pedrosa-Soares et al. (dados não publicados); b - Noce et al. (2000); c - Whittington et al. (2001); d - Silva et al. (2008); e - Petitgirard et al. (2009); f - Nalini et al. (2000); g - Basílio et al. (2000); h - Ribeiro-Althoff et al. (1997); i - Fernandes et al. (2000); j - Queiroga et al. (dados não publicados); k - Horn (2007); l - Campos et al. (2004). (*) Tamanho do corpo em relação à sua espessura: muito pequeno, < 0,5 m; pequeno, 0,5-5 m; médio, 5-15 m; grande, 15-50 m; e muito grande, >50 m. (**) Baseado em Černý (1991) (Pedrosa-Soares et al., 2009).

Nome do distrito e idade	Principais recursos minerais e minerais de coleção associados	Tamanho do pegmatito (*), tipo e classe (**)	Rocha geradora ou hospedeira
Pedra Azul, ca. 497 Ma ^a	água-marinha, topázio, quartzo	muito pequeno a pequeno, residual, a elementos raros	granitos
Padre Paraíso, ca. 519 Ma ^b	água-marinha, topázio, quartzo, goshenita	muito pequeno a pequeno, residual, a elementos raros	granitos e charnockito
Araçuai, 525-500 Ma ^{c,d}	espodumênio, granito ornamental, variedades gemológicas de turmalina, berilo e quartzo, feldspato industrial, schorlita, ambligonita, albita (cleavelandita), petalita, apatita, fosfatos raros, cassiterita, columbita-tantalita, bismutinita,	muito grande a muito pequeno, residual, a elementos raros	granitos, micaxisto, metagrauvaca, quartzito, rocha meta-ultramáfica
Ataléia, ca. 519 Ma ^b	água-marinha	muito pequeno a pequeno, residual, a elementos raros	granitos
São José da Safira, ca. 535 Ma ^e	feldspato industrial, turmalina, berilo (minério), muscovita, água-marinha, granada, albita (cleavelandita), apatita, heliodoro, Mn-tantalita, bertrandita, microlita, zircão	muito grande a médio, residual, a elementos raros a muscovita	granitos, micaxisto, metagrauvaca, quartzito, rocha meta-ultramáfica
Conselheiro Pena, ca. 582 Ma ^f	feldspato industrial, variedades gemológicas de turmalina, berilo e quartzo, berilo (minério), trífilita e fosfatos raros, kunzita	muito grande a médio, residual, a elementos raros	granitos, micaxisto, metagrauvaca, quartzito, rocha meta-ultramáfica
Malacacheta, ca. 535 Ma ^g	alexandrita, crisoberilo, muscovita, berilo	possivelmente residual e sistemas hidrotermais	granitos; micaxito, rocha meta-ultramáfica
Santa Maria de Itabira, ca. 650-500 Ma ^{h,i}	esmeralda, alexandrita, água-marinha, amazonita, fenacita	possivelmente anatóticos e sistemas hidrotermais	xisto ultramáfico, formação ferrífera, migmatito
Caratinga, ca. 575 Ma ^j	caolim, coríndon, berilo (minério)	possivelmente anatóticos, abissais	paragnaisse migmatítico
Espera Feliz, ca. 500 Ma ^k	água-marinha, topázio, quartzo	muito pequeno a pequeno, residual, a elementos raros	granitos
Espírito Santo, 575-490 Ma ^l	caolim, quartzo, água-marinha, topázio	muito pequeno a pequeno, residual, em geral anatóticos	paragnaisse migmatítico e granitos

Os pegmatitos estudados neste trabalho inserem-se nos distritos pegmatíticos de Araçuai, São José da Safira e Conselheiro Pena, os quais serão aqui brevemente descritos.

4.1 Distrito Pegmatítico de Araçuaí

A maioria dos pegmatitos do Distrito de Araçuaí são corpos residuais de granitos intrusivos da suíte G4, com espessuras variando de alguns metros até mais de 50 m. Os pegmatitos economicamente importantes são, em sua maioria, corpos externos. No entanto, pegmatitos pequenos e muito pequenos hospedados em biotita granitos podem ser ricos em berilo água-marinha de alta qualidade. As populações de pegmatitos mais importantes do distrito de Araçuaí encontram-se nos campos de Itinga, ricas em lítio, e de Coronel Murta, ricas em boro (Pedrosa-Soares et al., 2009, 2011).

Conteúdos anômalos de minerais de lítio, como espodumênio, petalita, lepidolita e/ou amblygonita, caracterizam a maioria dos pegmatitos do campo de Itinga. Este campo pegmatítico inclui corpos residuais derivados de plútons da suíte G4 Itaporé e do batólito Piauí. Em termos econômicos, os pegmatitos mais importantes são: os corpos de zonamento simples a não zonados muito ricos em espodumênio; corpos de zonamento complexo ricos em Li, B, Na, Cs, Ta e/ou Cs, mineralizados a espodumênio, petalita, lepidolita, amblygonita-montebrosita, albita, cleavelandita, elbaíta, cassiterita, tantalita e/ou polucita; e os corpos de zonamento simples a não zonados lavrados para rochas ornamentais (Correia Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 2009).

No campo pegmatítico de Itinga, as rochas hospedeiras são biotita xistos com quantidades locais variáveis de andaluzita, cordierita e sillimanita, e intercalações de rocha calciossilicática da Formação Salinas. Os silicatos metamórficos de baixa pressão (andaluzita e cordierita), junto à presença de petalita em alguns pegmatitos e dados geotermobarométricos quantitativos, sugerem um nível crustal relativamente raso (entre 5 e 10 km) para este campo. Os pegmatitos intrudiram através da foliação regional em sistemas de fratura da Formação Salinas, com mergulhos para SE e NW (Correia Neves et al., 1986; Pedrosa-Soares et al., 1987; Costa, 1989; in Pedrosa-Soares et al., 2009).

4.2 Distrito Pegmatítico de São José da Safira

Este distrito inclui pegmatitos residuais da Suíte G4 Santa Rosa e pegmatitos ricos em berilo e/ou muscovita. As rochas encaixantes são granada-mica xistos de fácies anfibólito, com sillimanita e granada-biotita gnaisse presentes localmente, ambos com intercalações de

rocha calciossilicática, quartzito do Grupo Macaúbas distal e rochas meta-ultramáficas (Pedrosa-Soares et al., 2009).

Segundo este último autor, a maioria dos corpos são tabulares, tabulares ramificados ou lenticulares, e muitos deles são muito grandes (> 50 m de espessura). No passado, este distrito foi muito importante pela produção de turmalinas de qualidade gemológica, além de minério de berilo e minerais industriais como feldspato potássico, mica e albita. Atualmente, tais pegmatitos são explorados principalmente para feldspato potássico industrial e minerais raros ou de coleção.

4.3 Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena

A maioria dos pegmatitos deste distrito são corpos residuais de granitos a duas micas do tipo-S da Suíte Urucum (tipo G2), cristalizados por volta de 582 Ma, e muitos deles são grandes (15 a 50 m de espessura) a muito grandes (acima de 50 m de espessura) (Nalini et al., 2000; Pedrosa-Soares et al., 2009). Granitos e pegmatitos foram posicionados principalmente ao longo de zonas de cisalhamento de alto ângulo. Os pegmatitos importantes são geralmente corpos externos encaixados em rochas de fácies anfibolito, como sillimanita-estauroлита-granada-mica xistos com intercalações de rochas calciossilicáticas, metagrauvas e quartzitos do Grupo Rio Doce (Pedrosa-Soares et al., 2009).

A maioria dos pegmatitos têm forma tabular ou lenticular, e alguns poucos possuem formato de “balão”. Eles geralmente apresentam zonamento complexo e mineralogia diversificada. O Distrito de Conselheiro Pena caracteriza-se por notáveis assembleias fosfáticas, que incluem depósitos econômicos de brazilianita. A trifilita é o principal fosfato primário, gerando dezenas de fosfatos metassomáticos ou secundários, como eosforita, hureaulita, reddingita, variscita, vivianita e frondelita (Cassedanne & Cassedanne, 1981; Cassedanne & Baptista, 1999; Scholz, 2006; Chaves & Scholz, 2008; Scholz et al., 2008).

4.4 Pegmatitos Estudados

Apresenta-se neste item a geologia local, em termos gerais, dos corpos pegmatíticos enfocados.

4.4.1 Mina da Cachoeira

A mina da Cachoeira localiza-se no médio vale do rio Jequitinhonha, junto ao Ribeirão Piauí, na divisa entre os municípios de Araçuaí e Itinga. Os vários corpos de pegmatitos explorados foram designados de “Grupo Pegmatítico da Cachoeira” (Romeiro et al., 1997; in Romeiro, 1998). Esta população de pegmatitos litiníferos ricos em espodumênio, se localiza na parte sul do campo pegmatítico de Itinga, pertencente ao Distrito Pegmatítico de Araçuaí (Correia Neves et al., 1986). A Figura 4.3A mostra um mapa representando os corpos deste grupo pegmatítico.

A mina da Cachoeira, situada no mapa Itaobim (Paes et al., 2008), possui as coordenadas UTM: 189 721 / 8142 540 – 305 m (ponto de amostragem). A Figura 4.3B ilustra como é realizado o acesso ao interior da mina. A Figura 4.3C mostra uma das galerias em desenvolvimento no interior da mina, evidenciando o contraste brusco de cores entre o pegmatito e o xisto encaixante.

Ainda segundo Romeiro (1998), o grupo da Cachoeira é representado por um conjunto de cinco corpos pegmatíticos, encaixados em biotita xisto da Formação Salinas, que constituem os depósitos lavrados na mina. Estes pegmatitos são homogêneos, e neles foram identificados quartzo, feldspato potássico (microclínio perítico), albita, muscovita e espodumênio como minerais principais primários. O espodumênio compõe cerca de 20% dos corpos, K-feldspato e albita cerca de 40 a 45%, quartzo aproximadamente 25% e muscovita menos de 10%. Durante os estudos foram ainda reconhecidos (nas pilhas de rejeito) berilo, columbita-tantalita, cassiterita e esfalerita, embora desconheça-se suas sequências paragenéticas. Os Nb-tantalatos, devido a uma relativa maior abundância se comparados aos demais minerais acessórios, foram analisados com microsonda eletrônica. Tais resultados são apresentados de forma resumida na Tabela 5.4, e nos Anexos I, II e III.

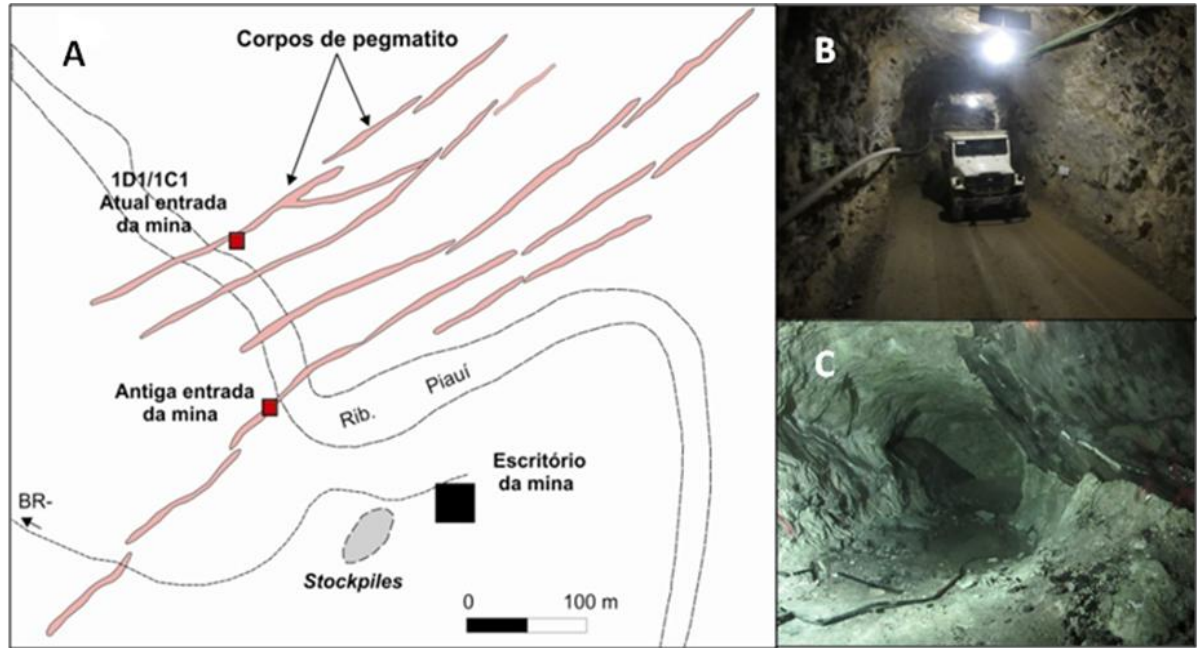


Figura 4.3 – A. Mapa do grupo pegmatítico da Cachoeira, mostrando os corpos pegmatíticos (incluindo projeções do subsolo) da mina da CBL, modificado de Romeiro (1998). B. Acesso ao interior da mina da Cachoeira. C. Galeria em pleno desenvolvimento no interior da mina da Cachoeira.

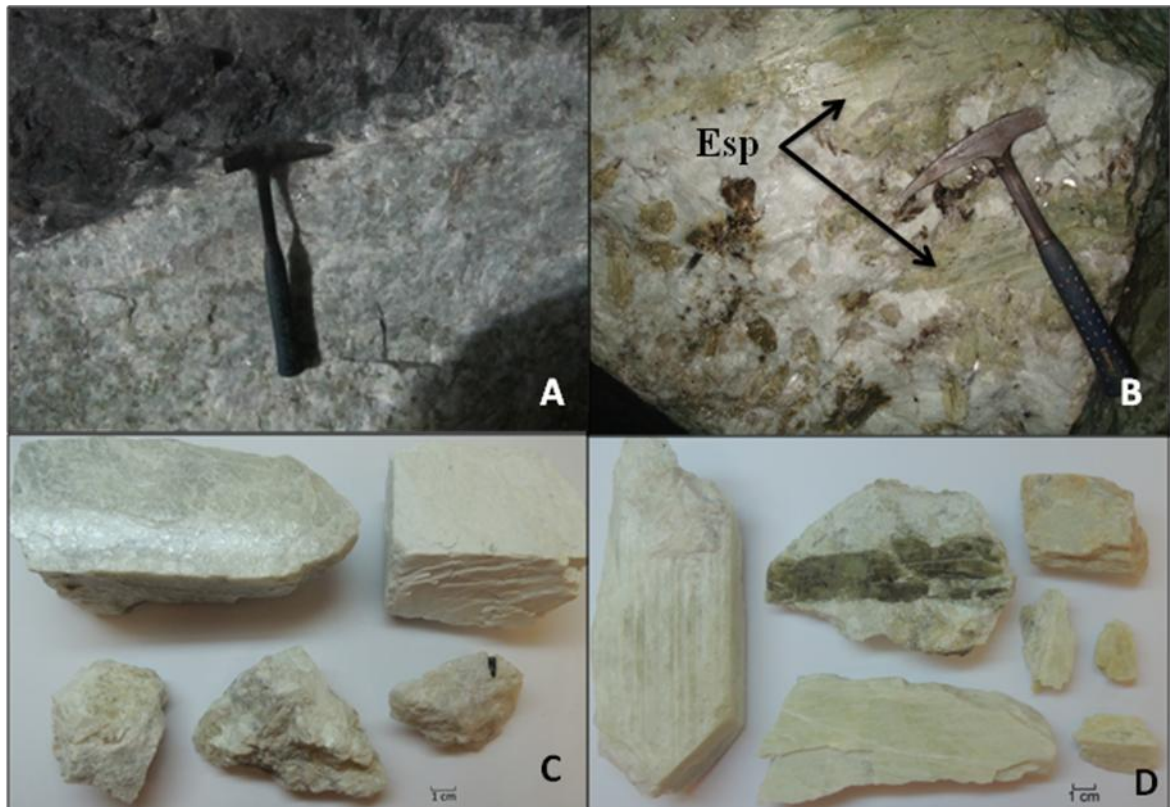


Figura 4.4 – A. Contato do pegmatito com o xisto. B. Detalhe do pegmatito da mina da Cachoeira, ressaltando os cristais de espodumênio (Esp). C. Amostras de feldspatos da mina da Cachoeira. D. Amostras de espodumênio da mina da Cachoeira.

Os corpos são homogêneos, tabulares, com mergulhos suaves a inclinados. Em relação à sistemática de classificação de Černý & Ercit (2005), esses pegmatitos podem ser enquadrados na classe de pegmatitos a elementos raros, subclasse ELR-Li, tipo albita-espodumênio.

Os cristais de espodumênio apresentam limites muito bem definidos em relação aos demais cristais do corpo e podem atingir dimensões de até um metro e meio, sendo que o tamanho médio dos grãos oscila entre 10 e 20 cm. Ocorrem sob a forma prismática incompleta, como cristais tabulares. A cor característica do mineral é verde claro, porém tons amarelos e brancos também são comuns (Romeiro, 1998). A maior parte do espodumênio nesta mina cristalizou-se, provavelmente, diretamente dos fluidos formadores dos pegmatitos. Existe, porém, uma menor quantidade de cristais transparentes, verde amarelados, que pode ter sido formada através de fluidos mais tardios, uma vez que preenchem fraturas e/ou cavidades.

A Figura 4.4A representa o contato entre o xisto e o pegmatito. A Figura 4.4B mostra cristais de espodumênio, com albita e muscovita, no interior da mina. As Figuras 4.4C e 4.4D mostram as amostras de feldspatos e espodumênios, respectivamente, coletadas na mina da Cachoeira. Apesar de terem sido coletadas algumas amostras no interior das galerias subterrâneas, a maioria provém das pilhas externas, sendo portanto difícil definir o local exato do pegmatito do qual as amostras procedem.

Pelo menos em um dos corpos, nota-se a tendência de diminuição da granulação dos cristais de espodumênio do topo para a base (Figura 4.5). Romeiro (1998) interpreta que a concentração de espodumênio com granulação mais grossa ocorre devido ao acúmulo de fluidos aquosos no topo do corpo, ou em porções onde o pegmatito apresenta mergulho baixo. Para esse autor, a retenção de fluidos aquosos ascendentes é responsável pela diminuição da viscosidade e, conseqüentemente, diminuição da densidade da nucleação na fusão silicatada.

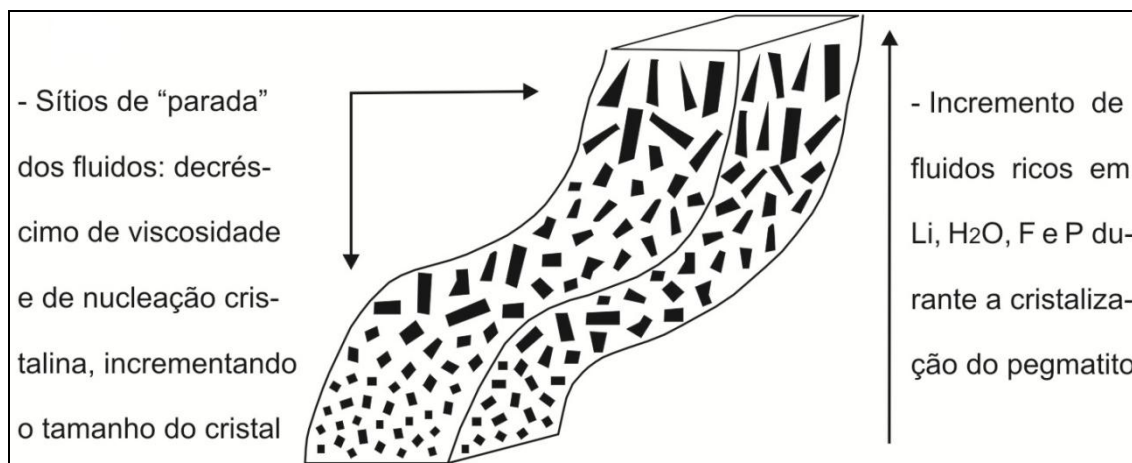


Figura 4.5 – Esquema mostrando a tendência de crescimento dos cristais para o topo do corpo (conforme Romeiro, 1998).

Os pegmatitos nesta região foram originados durante a granitogênese tardi- a pós-tectônica brasileira (550-500 Ma), resultante de anatexia da espessa crosta resultante dos estágios colisionais (Pedrosa-Soares et al., 1994; in Romeiro, 1998). Sá (1977) apresentou uma idade de 467 ± 18 Ma para os pegmatitos da Cachoeira, os quais foram datados pelo método K-Ar em muscovita.

4.4.1.1 Nb-tantalatos da mina da Cachoeira

Neste depósito, diversas amostras de Nb-tantalatos foram coletadas e identificadas (Figura 4.6). Surpreendentemente, algumas delas revelaram ser ixiolita, mineral nunca antes descrito na PPOB, fato que justifica a relevância da inclusão de tal investigação (trabalho completo apresentado no Anexo I). A identificação da fase ixiolita foi confirmada através de análises de difração de raios-X (Laboratório do DEMIN, Escola de Engenharia, UFMG); tais resultados constam no Anexo II.



Figura 4.6 – Amostras de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira.

4.4.2 Lavra da Chapadinha

A lavra da Chapadinha, uma das lavras do grupo pegmatítico do Maxixe (lavrado desde a 2ª Grande Guerra Mundial), está localizada no município de Itinga, e pertencem à Mineração Arqueana; atualmente ela está em pesquisa pela MAGNESITA S.A. Suas coordenadas UTM no mapa Itaobim (Paes et al., 2008) são: 192 759 / 8140 180 – 337 m. O local desta lavra encontra-se parcialmente alagado, e as galerias principais de acesso ao corpo estão submersas, como pode ser visto na Figura 4.7A.

Sua operação original, subterrânea, visava a produção de feldspato industrial e petalita; serviços garimpeiros nos anos de 2010-2011 produziram cerca de 500 kg de material com aproveitamento gemológico ou de coleção. Este pegmatito também produziu ocasionalmente turmalinas de cor verde ou rosa (Cornejo & Bartorelli, 2010). Observou-se, nos trabalhos de campo, que albita e lepidolita são abundantes nas pilhas de rejeitos no entorno da lavra. A Figura 4.7B mostra um fragmento do pegmatito, contendo albita, lepidolita e elbaíta verde. Os espodumênios de qualidade gemológica recuperados variavam em tonalidades de verde pálido a incolor ou amarelado até um tom verde garrafa (Figura 4.7C). Tais cristais foram provavelmente formados por fluidos posteriores à cristalização primária. As amostras de feldspatos coletadas estão representadas na Figura 4.7D. Em função da situação atual da lavra, todas as amostras foram coletadas em pilhas de rejeito ao redor da entrada.

Sá (1977) apresentou uma idade de 490 ± 12 Ma para um dos pegmatitos do grupo do Maxixe (provavelmente o principal), que foram datados pelo método K-Ar em muscovita. Segundo a classificação de Černý & Ercit (2005), o corpo enfocado pode ser enquadrado na classe de pegmatitos a elementos raros, subclasse ELR-Li, tipo complexo.

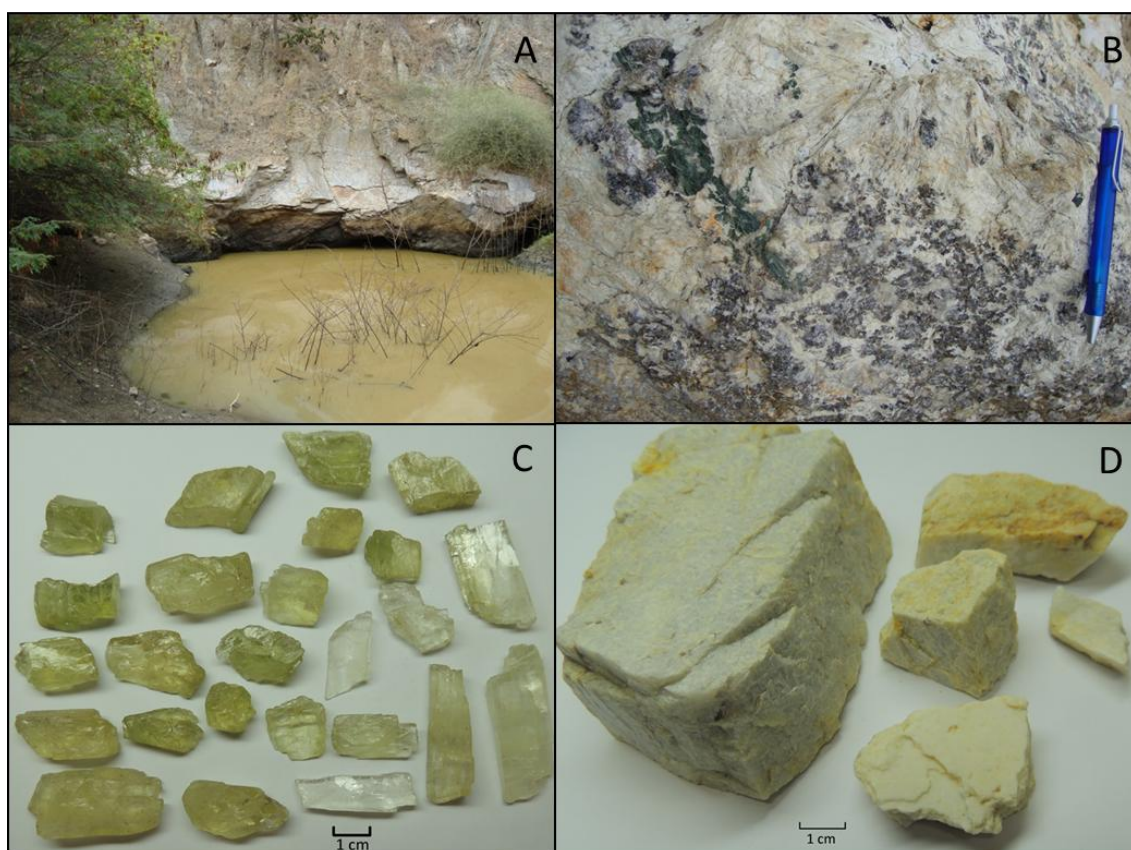


Figura 4.7 – A. Entrada alagada de uma galeria de acesso ao pegmatito da Chapadinha. B. Amostra do pegmatito da Chapadinha. C. Amostras de espodumênio verde gemológico, com variadas intensidades de cor, da lavra da Chapadinha. D. Amostras de feldspatos da lavra da Chapadinha.

4.4.3 Lavra de Neves

A lavra de Neves está localizada no mapa Novo Cruzeiro (Morais Filho, 1996), e possui as coordenadas UTM: 189 092 / 8115 472 – 496 m. A lavra situa-se no município de Araçuaí, nas proximidades do vilarejo homônimo, distante cerca de 25 km a sudeste da sede municipal. Segundo informações locais, a lavra é antiga, estando em atividade intermitente há pelo menos 60 anos.

O pegmatito da lavra de Neves encontra-se encaixado em biotita-xistos, localmente ricos em andaluzita, pertencentes à Formação Salinas. O corpo é aproximadamente concordante com a xistosidade da encaixante, de atitude $N50^{\circ}E/50^{\circ}NW$. Sua espessura aparente é de cerca

de 10 m, não apresentando zonamento típico. Em pequenos *pockets*, em geral decimétricos, a albita aparece fortemente alterada para caulim, onde ocorrem diversos minerais juntamente ao espodumênio verde transparente, tais como cassiterita, columbita-tantalita e elbaíta rósea e verde. O verde do espodumênio varia de bem claro até bastante intenso. Tais cristais parecem ter sido formados por fluidos hidrotermais, pois ocorrem sempre em “caldeirões”, junto com a albita.

De acordo com a classificação de Černý & Ercit (2005), este corpo possivelmente pode ser enquadrado na classe de pegmatitos a elementos raros, subclasse ELR-Li, tipo complexo. Estudos adicionais, entretanto, fazem-se ainda necessários.

A Figura 4.8A mostra a entrada do pegmatito de Neves; a Figura 4.8B ilustra o processo de albitização intenso e posterior caulinização ocorrido nesta lavra; e as Figuras 4.8C e 4.8D ilustram os minerais amostrados na lavra de Neves. Tais minerais foram coletados na entrada e no interior da lavra, porém devido à forte albitização do pegmatito é difícil concluir de qual zona eles provêm.

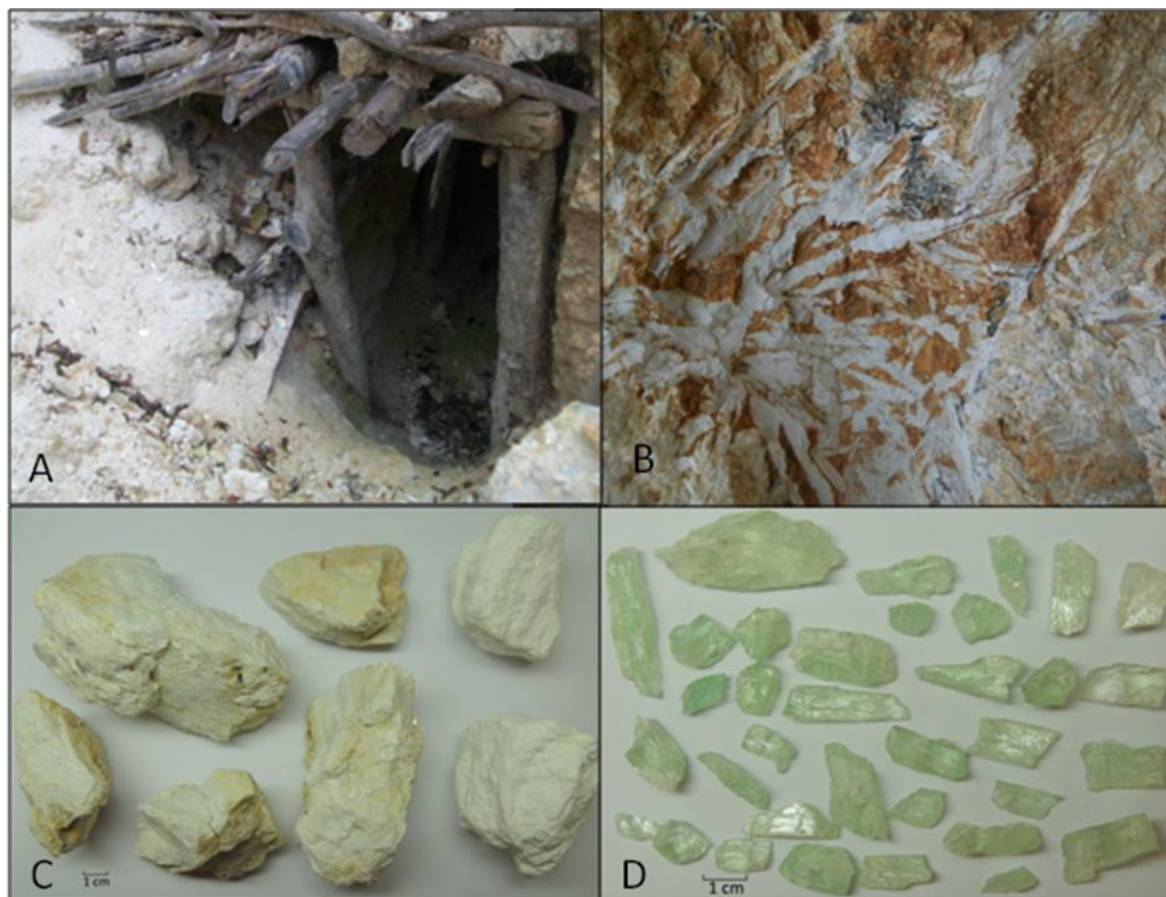


Figura 4.8 – A. Entrada da galeria de acesso ao pegmatito de Neves. B. Detalhe do processo de albitização/caulinização. C. Amostras de feldspato da lavra de Neves. D. Amostras de espodumênio verde gemológico, com variadas intensidades de cor, da lavra de Neves.

4.4.4 Lavra da Santa Rosa

A lavra da Santa Rosa é famosa por suas turmalinas coloridas, e pode ser considerada uma das dez maiores produtoras de turmalina no mundo. Foi descoberta em 1967, no município de Itambacuri, numa parte depois desmembrada para o atual município de Franciscópolis. O acesso à lavra pode ser feito através da cidade de Itambacuri, distante 31 km ao sul de Teófilo Otoni, e a seguir por uma estrada de chão por 36 km. No mapa de Itambacuri (Signorelli, 1996), suas coordenadas são: 193 635 / 8002 709 – 336 m.

A lavra se iniciou na zona intemperizada do pegmatito, por 150 m nos primeiros 6 anos, até atingir o pegmatito primário, inalterado. Santa Rosa produziu e continua produzindo elbaítas de qualidade excepcional, em todas suas principais cores (Cornejo & Bartorelli, 2010).

O pegmatito Santa Rosa, fortemente alterado, tem uma inclinação suave e está encaixado concordantemente com a foliação dos quartzo-mica xistos da Formação São Tomé (Grupo Rio Doce), de idade Neoproterozóica (Delaney, 1996). É diferenciado e zonado, possui forma tabular a lenticular, com espessura de 1 a 5 metros (Signorelli, 1996). O espodumênio possui coloração branca a creme, e é provavelmente um mineral primário nesta lavra; as porções mais alteradas deste mineral (com aspecto fibroso e quebradiço) são designadas pelos garimpeiros de “palmito”. Parte do espodumênio da lavra de Santa Rosa apresenta coloração levemente rosada, embora não possua qualidade gemológica. A ocorrência de espodumênios de hábito fibroso (“palmito”), bem como a ocorrência de elbaítas “em cabelos”, isto é, também fibrolizadas, indica provavelmente processos de alteração tardios.

A Figura 4.9A mostra a vista geral da pilha de rejeitos, a Figura 4.9B ilustra o mecanismo de retirada do material lavrado, e a Figura 4.9C mostra a placa de entrada da lavra.



Figura 4.9 – Lavra da Santa Rosa. A. Ponto de acesso ao local de retirada do material da lavra subterrânea. B. Detalhe da placa de entrada da lavra, com dados do processo no DNPM. C. Vista geral da pilha de rejeitos.

As Figuras 4.10A, B e C mostram os minerais amostrados nesta lavra. A maioria foi coletada nas pilhas de rejeito, devido ao difícil acesso às galerias.

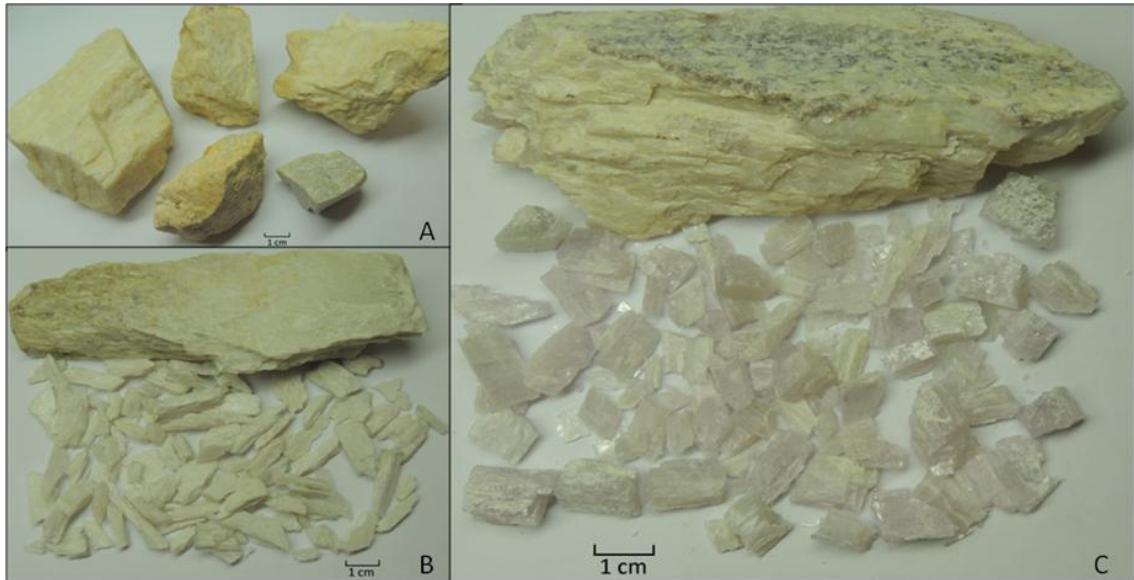


Figura 4.10 – A. Amostras de feldspatos da lavra da Santa Rosa. B. Amostras de espodumênio do tipo “palmito” da lavra. C. Amostras de espodumênio rosa claro, não gemológico.

4.4.5 Urucum

O pegmatito Urucum ou Córrego do Urucum (propriedade de GEOMETA Ltda.) está situado a leste do município de Galiléia. As coordenadas UTM do ponto marcado por GPS da lavra, no mapa Conselheiro Pena (Oliveira, 2000), são: 241 136 / 7894 805 – 287 m. A Figura 4.11A mostra a placa de acesso ao local da lavra e a Figura 4.11B, a entrada da galeria principal em exploração atualmente.

As Figuras 4.11C e 4.11D ilustram as amostras obtidas do pegmatito Urucum. Os feldspatos foram amostrados para fins de análises geoquímicas, com o objetivo de estabelecer algum possível padrão entre os diversos pegmatitos estudados. As amostras de espodumênio (kunzita) foram obtidas através de doação do Engenheiro de Minas Luiz Alberto Dias Menezes Filho (*in memoriam*).

As rochas da área pertencem ao Grupo Rio Doce, do Neoproterozóico. São micaxistos com estauroлита da Formação São Tomé (desse grupo), que foram intrudidos por cúpulas de granitos e pegmatitos (Moura et al., 1978, in Cassedanne, 1986). As rochas graníticas próximas de Galiléia foram datadas em 582 ± 2 Ma (Nalini et al., 2000). A Figura 4.12 apresenta um esboço geológico esquemático da mina.



Figura 4.11 – A. Ponto de acesso à lavra do Urucum. B. Entrada da galeria principal da lavra do Urucum. C. Amostras de feldspatos da lavra do Urucum. D. Amostras de kunzita da lavra do Urucum.

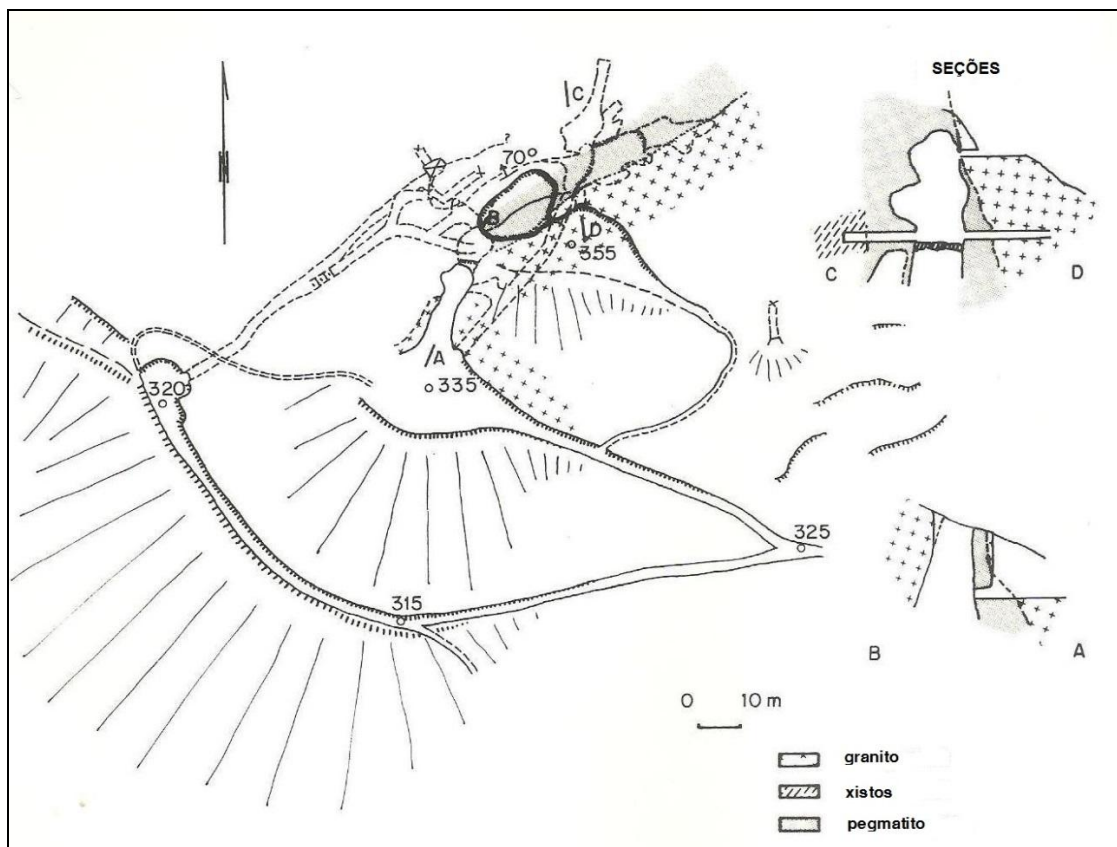


Figura 4.12 – Esboço geológico da lavra do Córrego do Urucum (Cassedanne, 1986).

O pegmatito consiste de um corpo grande, lenticular, de direção geral ESE-WNW, com mergulho acentuado para oeste. A rocha encaixante é um biotita-granito de granulometria fina, contendo grandes fenocristais de feldspato potássico sem orientação preferencial. O nítido zonamento observado inclui uma zona delgada rica em schorlita, em contato com o granito, seguida de uma zona granítica de granulometria mais grossa. Em seguida, encontra-se a zona dos cristais gigantes, com corpos de substituição em grandes bolsões, ou *pockets*.

Conforme Cassedanne (1986), desta última zona, foram extraídas mais de 10 toneladas de cristais de feldspato, ripas de espodumênio de até 2 m de comprimento, cristais métricos de schorlita, grandes livros de muscovita e finos cristais de berilo; nódulos irregulares de quartzo fumê foram encontrados em associação a massas de uraninita e loellingita. O núcleo do pegmatito em rosário consiste em cristais de quartzo leitoso de até 1 m.

A espessura do pegmatito excede 20 m próximo à sua porção central, e parece diminuir de acordo com a profundidade. Xenólitos de xisto, cercados por grandes cristais de schorlita, são comuns. Apófises pegmatíticas se encaixam no granito hospedeiro em vários pontos (Cassedanne, 1986). Na classificação de Černý & Ercit (2005), o pegmatito do Urucum provavelmente pode ser enquadrado na classe de pegmatitos a elementos raros, subclasse ELR-Li, e no tipo complexo.

Nesta lavra descobriu-se uma zona muito rica em kunzita, que tornou o local mundialmente famoso. Foram retiradas 3 toneladas de espodumênio de qualidade gemológica, dentre as quais 500 kg eram de qualidade excepcional, na maior parte kunzita com muito poucos cristais verdes e nenhum amarelo, ocorrendo em drusas de aproximadamente 1,5 m de diâmetro; os maiores espécimes chegavam a pesar 2 kg. A câmara resultante desta extração tinha dimensões enormes: 15 a 20 metros de altura por uma seção de 10x15 metros (Cassedanne, 1986).

Conforme Cassedanne (1986), o espodumênio se formou em dois estágios no pegmatito do Urucum. O primeiro estágio é representado por cristais alongados de até vários metros de comprimento, fortemente corroídos, de cor branca a creme. O segundo estágio consiste principalmente de kunzita. Seus cristais são longos e prismáticos, com seção quadrada ou retangular, e faces longitudinais estriadas. Alguns cristais são incolores, com uma extremidade quase hialina, amarela ou rosa muito pálido, passando gradativamente para uma

coloração mais intensa na outra extremidade. O pleocroísmo é muito intenso, sendo percebido facilmente à vista desarmada por simples rotação. A cor de certos cristais perde intensidade quando expostos à luz .

4.4.6 Lavra do Jairo Lingüiça

A lavra do Jairo situa-se a seis quilômetros de Resplendor, na margem esquerda do Rio Doce. As coordenadas UTM da lavra, no mapa Conselheiro Pena (Oliveira, 2000), são: 265 217 / 7858 209 – 150 m. As amostras de espodumênio (kunzita) foram obtidas através de doação do Engenheiro de Minas Luiz Alberto Dias Menezes Filho (*in memoriam*).

O pegmatito é um corpo grande, apresentando zonamento, e encaixado em xistos da Formação São Tomé. Sua produção principal consistiu de inúmeros caldeirões de quartzo, pequenos caldeirões de turmalina na forma de finos cristais de cor verde a azul, diversas cavidades contendo cristais de schorlita e grande quantidade de berilo de qualidade industrial. Em julho de 1989, foi encontrado o “caldeirão” mais importante, contendo mais de uma tonelada de espodumênio lilás ou azul-arroxeadado, verde claro, incolor, bicolor e até mesmo tricolor, medindo até 1 m de comprimento, parcial ou totalmente limpo (Cornejo & Bartorelli, 2010). Um cristal extraordinário dessa produção foi mostrado na revista *Mineralogical Record*, v. 41, n. 3 (Figura 4.13). Como o espodumênio desta lavra provém de cavidades, tais cristais devem ter sido formados por fluidos póstumos, provavelmente hidrotermais. Além disso, o exemplar da Figura 4.13 pode indicar a possibilidade de existência de duas gerações distintas de fluidos hidrotermais formadores do espodumênio, que depositaram primeiro a variedade kunzita e posteriormente a variedade hiddenita.



Figura 4.13 – Exemplar de excepcional qualidade (uma “masterpiece” mineralógica) de espodumênio kunzita com terminação em hiddenita da lavra do Jairo Linguça, com 19 cm de comprimento (Mineralogical Record, v. 41).

4.4.7 Lavra da Sapucaia

O pegmatito Sapucaia está localizado no município de Galiléia, no vale do Rio Doce, e foi provavelmente descoberto nos anos 20 ou 30 do último século, mas a atividade mineradora intensa começou apenas na Segunda Guerra Mundial (Cassedanne & Baptista, 1999). No mapa de Itabirinha de Mantena (Vieira, 1996), suas coordenadas são: 238 300 / 7908 300 – 230 m. As rochas encaixantes são biotita xistos do Grupo Rio Doce, de idade Neoproterozóica (Formação São Tomé).

O corpo é bem zonado, com formato aproximadamente oval; espodumênios são abundantes próximo ao núcleo do pegmatito. Sua parte central é composta essencialmente de massas de pertita gigante contendo numerosos livros de muscovita de cor pálida, estruturas irregulares de quartzo, várias massas alongadas de berilo de qualidade industrial, grandes ripas de espodumênio branco alterado com mais de 2 m de comprimento, e massas ramificadas de trifilita de até muitas toneladas. Albita, montebrasita, muscovita, quartzo, turmalina, esfalerita e outros sulfetos ocorrem intercrescidos com a trifilita inalterada. Fluidos hidrotermais gerados no pegmatito produziram uma grande variedade de minerais secundários na forma de massas esferulíticas, fibras, agulhas e cristais bem formados em cavidades dentro ou adjacente ao berilo, muscovita, quartzo, trifilita e outros minerais (Cassedanne & Baptista, 1999). O espodumênio desta lavra é provavelmente um mineral primário, tendo sido cristalizado nas proximidades do núcleo; posteriormente, fluidos hidrotermais podem ter alterado este e outros minerais. Como a amostra proveniente desta lavra foi coletada nas pilhas de rejeito, não é possível afirmar em qual zona do pegmatito ela foi formada.

Segundo a classificação de Černý & Ercit (2005), este corpo pode ser enquadrado na classe de pegmatitos a elementos raros, subclasse ELR-Li, tipo complexo.

5 ANÁLISES COM MICROSSONDA ELETRÔNICA

5.1 Aspectos gerais

A microsonda eletrônica proporciona o uso de uma técnica de análise não destrutiva *in situ*, que revolucionou o conhecimento da química dos materiais nas últimas décadas. O equipamento combina os princípios do microscópio eletrônico e microscopia ótica, permitindo a determinação da composição química de qualquer material em região selecionada com aproximadamente 2 μm de diâmetro (Gomes, 1984; Goldstein, 2003; Porphírio et al., 2010).

A microsonda eletrônica é constituída por um sistema elétron-ótico (formação do feixe eletrônico), sistema ótico (visualização da amostra) e sistema ótico de raios X (conjunto de detecção e análise dos elementos). Compõem ainda o equipamento, os sistemas de vácuo, leitura e registro. A análise do material requer seções polidas ou lâminas delgadas polidas, tornando-se indispensável uma metalização com Al, C, Au, entre outros metais (Gomes, 1984).

Os raios X característicos dos elementos gerados na amostra podem ser analisados pelo método de dispersão de energia (EDS) ou dispersão de comprimento de onda (WDS). Esse último método emprega espectrômetros de cristais curvos e contadores posicionados de modo a obedecerem à relação proposta pela “Lei de Bragg”. Nas microsondas mais modernas, é possível analisar comprimentos de onda compreendidos entre 1 e 100 Å , para elementos com número atômico acima do boro ($Z > 5$) (Goldstein, 2003; Porphírio et al., 2010).

A microsonda eletrônica é um instrumento eficaz para identificação e caracterização química dos minerais, fornecendo uma estreita correlação entre a composição e a morfologia. É uma técnica que permite a determinação de fases coexistentes, lamelas de exsolução, inclusões, alterações e zonamentos. Tem também sido utilizada com êxito em análises modais e mesmo em análises químicas de rochas (Gomes, 1984; Porphírio et al., 2010).

5.2 Análises pertinentes

Para a realização deste trabalho, foram inicialmente feitas análises com microsonda eletrônica de espodumênios e feldspatos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, assim como em nióbio-tantalatos da mina da Cachoeira (resultados completos apresentados no Anexo III). As seções polidas de tais amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Microanálises do Departamento de Física, localizado no Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, onde foram analisadas por microsonda eletrônica, utilizando-se um aparelho JEOL-JXA8900R, nos modos WDS (quantitativo) e EDS (semiquantitativo).

As condições analíticas empregadas na microsonda eletrônica foram as seguintes: tensão de aceleração = 15 kV, corrente do feixe na amostra = $2,00 \times 10^{-8}$ A (20nA), diâmetro do feixe = 20 micrômetros (devido à presença de sódio, algumas amostras eram sensíveis a um feixe muito pequeno). Feldspatos e espodumênios foram analisados pela mesma rotina, utilizando-se os seguintes padrões: apatita (para P_2O_5), anortita (CaO), Cl-apatita (Cl), fluorita (F), jadeíta (Na_2O), Al_2O_3 (Al_2O_3), sanidina (K_2O), MgO (MgO), magnetita (FeO), quartzo (SiO_2) e rodonita (MnO).

5.2.1 Espodumênios

Para os diversos tipos de espodumênio analisados, os resultados encontram-se na Tabela 5.1. Com exceção das amostras de kunzita das lavras Urucum e Sapucaia, todas as outras amostras analisadas possuem teores de SiO_2 acima do ideal (64,58%); como os fechamentos foram considerados bons, as ligeiras discrepâncias observadas em torno de 101% podem ser atribuídas ao efeito dessa maior contagem de silício. Os teores de Al_2O_3 estão bastante próximos da composição ideal (27,40% Al_2O_3), com exceção do espodumênio verde amarelado gemológico da mina da Cachoeira, que apresenta cerca de 3% desse óxido a menos que o ideal, além de possuir o maior conteúdo de FeO (0,72%), indicando processos de substituição iônica.

Assim, de maior importância, destaca-se os teores de FeO que variam mais amplamente, entre 0,02 e 0,72%, sendo que as kunzitas possuem os menores valores (0,02 a 0,05%), enquanto os espodumênios verde amarelados gemológicos (Ch, Ca1 e Ca2) apresentam teores

de FeO da ordem de 15 a 20 vezes maiores que os valores das kunzitas. Em princípio, portanto, esses dados poderiam ressaltar alguma relação com as cores dessas variedades. Já as variações de Na₂O, MnO e F são desprezíveis, dentro das faixas de 0,09 a 0,16%; 0,05 a 0,08%; e 0,05 a 0,08% respectivamente. Foram ainda analisados P₂O₅, K₂O, CaO, MgO e Cl, todos com valores ínfimos ($\leq 0,02\%$), e por isso desprezados na montagem da tabela. O teor ideal de lítio, não passível de ser analisado na microsonda, é de 8,03%, sendo adicionado às análises para melhor compreensão dos dados.

Tabela 5.1 – Análises com microsonda eletrônica em espodumênios de diferentes tipos e localidades. Pegmatitos: Ur – Urucum (kunzita), Ca1 – Cachoeira 1 (gemológico verde amarelado), Ca2 – Cachoeira 2 (“industrial” verde escuro), Ne – Neves (gemológico verde), Ch – Chapadinha (gemológico verde amarelado), SR1 – Santa Rosa 1 (rosado não gemológico), SR2 – Santa Rosa 2 (alterado, “palmito”), Ja – Jairo (kunzita), Sa – Sapucaia (rosado não gemológico) (médias de 5 *spots*; dados em % em peso; todo ferro como FeO; nd = não determinado; Li₂O* ideal).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	FeO	F	Total	Li ₂ O*	Total2
Ur	62,89	27,40	0,12	0,07	0,02	0,05	90,58	8,03	98,58
Ca1	65,33	24,09	0,11	0,07	0,72	0,06	90,41	8,03	98,41
Ca2	65,25	27,23	0,16	0,08	0,51	0,06	93,32	8,03	101,32
Ne	66,05	27,20	0,10	0,05	0,24	0,05	93,72	8,03	101,72
Ch	65,70	26,83	0,14	0,07	0,64	nd	93,40	8,03	101,41
SR1	66,03	27,29	0,10	0,06	0,02	nd	93,51	8,03	101,53
SR2	65,70	26,85	0,09	0,05	0,04	nd	92,74	8,03	100,76
Ja	65,73	27,00	0,12	0,08	0,04	nd	92,99	8,03	101,00
Sa	64,19	27,50	0,13	0,06	0,05	0,08	92,01	8,03	100,04

Para efeitos de comparação, são apresentados na Tabela 5.2 os dados de análises de vários tipos de espodumênio, de diferentes localidades, conforme Charoy et al. (1992). Esse trabalho foi um dos poucos encontrados na literatura com dados químicos mais detalhados sobre o mineral (podem também ser citados Drysdale, 1985; Thomas et al., 1994; Filip et al., 2006). As amostras de Portugal são CHN5 (espodumênio de um dique de aplito-pegmatito granítico rico em Li do distrito de Covas Barroso) e GEL (dique de aplito-pegmatito granítico onde o espodumênio é uma fase acessória); ambas correspondendo a espodumênios “industriais”. As demais amostras analisadas por este autor são kunzitas. PALA é uma amostra do famoso distrito de Pala, Califórnia (Estados Unidos); ANJ e SAH são de pegmatitos de Madagascar; e ARA é uma amostra do distrito de Araçuaí (MG), Brasil (uma das localidades enfocadas neste trabalho), cuja procedência exata não é fornecida.

Tabela 5.2 – Análises de espodumênios “industriais” de Portugal e de kunzitas de diferentes países por “via úmida” (Charoy et al., 1992). Pegmatitos: CHN5 – distrito de Covas Barroso; GEL – área de Gelfa; PALA – distrito de Pala, Califórnia (EUA); ANJ – Anjana (Madagascar); SAH – Sahatany (Madagascar); e ARA – Araçuaí (MG) (dados em % em peso; todo ferro como Fe_2O_3 ; nd= não determinado).

	SiO_2	Al_2O_3	Li_2O	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	MnO	MgO	H_2O	CO_2	Total
CHN5	64,25	26,29	7,69	0,41	0,16	0,16	0,03	0,01	0,55	0,25	99,80
GEL	64,27	26,35	7,58	0,49	0,23	0,25	0,11	0,06	0,51	0,10	99,95
PALA	64,43	27,46	7,70	0,10	0,26	0,07	0,05	<0,01	0,19	0,07	100,33
ANJ	64,45	27,58	7,73	0,04	0,21	0,05	0,07	<0,01	0,14	0,04	100,31
SAH	64,46	27,46	7,75	0,07	0,22	0,07	0,07	<0,01	0,18	0,07	100,35
ARA	64,52	27,19	7,75	0,22	0,16	0,01	0,10	<0,01	0,06	nd	100,01

Observando a Tabela 5.2, os teores dos óxidos principais SiO_2 , Al_2O_3 e Li_2O são bastante próximos das composições ideais (64,58% SiO_2 ; 27,40% Al_2O_3 ; e 8,03% Li_2O). As amostras de kunzitas apresentam teores de SiO_2 e Al_2O_3 ligeiramente maiores que os espodumênios (industriais) portugueses, ocorrendo o inverso para o Fe_2O_3 . De fato, destacam-se os valores maiores de Fe_2O_3 (além de K_2O) para as amostras de Portugal, confirmando-se o baixo conteúdo desses elementos nas kunzitas.

Com relação aos espodumênios analisados neste trabalho (Tabela 5.1), as análises da Tabela 5.2 apresentam valores de SiO_2 e Al_2O_3 mais próximos das composições ideais, o que provavelmente possa ser atribuído aos diferentes métodos utilizados para análise. Assim, deve ser ainda destacado o conteúdo local relativamente expressivo de K_2O , H_2O e CO_2 , os quais na microsonda não foram detectados. Entretanto, nenhuma diferença significativa foi observada, e as anomalias relativas em Fe_2O_3 detectadas nos espodumênios portugueses ficam impossibilitadas para comparações sobre cor, uma vez que imagens dessas amostras não são fornecidas.

5.2.2 Feldspatos

Entre os feldspatos, foram analisados microclínio e albita de quatro diferentes pegmatitos: Urucum, Cachoeira, Santa Rosa e Neves. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Análises com microsonda eletrônica em microclínios e albitas de diferentes pegmatitos. Pegmatitos: MUr – Urucum (microclínio), AUr – Urucum (albita); MCa – Cachoeira (microclínio), ACa – Cachoeira (albita); MSR1 – Santa Rosa 1 (microclínio branco), MSR2 – Santa Rosa 2 (microclínio rosado); ANe – Neves (albita) (médias de 5 *spots*; dados em % em peso; todo ferro como FeO; nd = não determinado).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	F	MnO	FeO	Cl	MgO	Total
MUr	65,59	18,39	15,35	0,63	nd	0,11	nd	0,01	0,01	nd	nd	100,10
MCa	64,98	18,40	15,48	0,39	nd	0,21	nd	0,00	0,02	nd	nd	99,48
MSR1	64,70	18,65	15,75	0,45	nd	0,52	nd	0,01	0,02	nd	nd	100,10
MSR2	64,83	18,31	16,03	0,09	nd	0,08	nd	0,01	0,03	nd	nd	99,38
AUr	68,62	19,65	0,15	10,45	0,11	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	99,14
ACa	67,20	20,00	0,12	10,44	0,06	0,46	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	98,35
ANe	67,48	19,84	0,15	10,49	0,08	0,19	0,06	0,01	0,02	0,01	0,00	98,30

Para os microclínios analisados, os teores de SiO₂ e Al₂O₃ se aproximam bastante daqueles da composição ideal (64,76% SiO₂ e 18,32% Al₂O₃). Os teores de K₂O, entretanto, mostram-se bem abaixo do valor esperado (16,92%). Como tais valores menores são acompanhados por respectivos aumentos nos valores de Na₂O, provavelmente a substituição dos primeiros pelos últimos está ocorrendo. Destaca-se ainda ligeiras anomalias (~0,5%) em P₂O₅ em um dos microclínios da lavra Santa Rosa, bem como na albita da mina da Cachoeira.

Com relação à composição ideal, todas as albitas analisadas apresentam teores de Na₂O, Al₂O₃ e CaO um pouco abaixo dos seus respectivos valores (67,39% SiO₂; 20,35% Al₂O₃; 11,19% Na₂O; e 1,07% CaO). As albitas das lavras de Neves e Urucum mostram teores de SiO₂ acima dos ideais. A albita da mina da Cachoeira apresenta o maior valor de P₂O₅, da ordem de 5 vezes superior aos dos outros. Os conteúdos em sódio e potássio variam muito pouco, respectivamente entre 10,44 e 10,49%; e 0,12 e 0,15%.

Entre os elementos maiores, pelas análises de microsonda eletrônica não se observaram anomalias que permitissem identificar possíveis relacionamentos dos feldspatos analisados com suas respectivas ocorrências de espodumênio.

5.2.3 Nb-tantalatos

Os resultados das análises com microsonda eletrônica são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Análises com microsonda eletrônica de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (dados em % em peso; medias de 4 ou 5 pontos; todo Fe como FeO; análises “a” e “b” mostram composições distintas dentro do mesmo grão).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Espécie
Am1	30,55	48,13	11,76	7,54	0,65	1,09	0,28	100,01	columbita-(Fe)
Am2	39,14	40,29	10,35	8,16	0,66	0,62	0,06	99,27	columbita-(Fe)
Am3	22,19	54,56	13,82	5,91	0,85	1,81	0,08	99,23	columbita-(Fe)
Am4	42,20	37,30	10,26	8,51	0,71	0,54	0,04	99,57	tantalita-(Fe)
Am5	20,11	57,36	14,16	6,32	0,75	1,71	0,13	100,53	columbita-(Fe)
Am6	22,21	54,75	14,07	6,01	1,25	2,00	0,08	100,37	columbita-(Fe)
Am7	52,62	17,52	8,85	5,12	13,51	1,30	0,07	98,99	ixiolita
Am8	49,46	31,24	8,54	9,42	0,62	0,36	0,10	99,72	tantalita-(Mn)
Am9a	47,57	30,39	10,75	6,72	1,69	2,03	0,29	99,44	tantalita-(Fe)
Am9b	53,36	16,85	8,88	5,48	13,59	1,28	0,06	99,50	ixiolita
Am10	30,94	47,79	11,92	7,68	0,66	0,93	0,17	100,08	columbita-(Fe)
Am11	21,06	55,25	13,81	6,03	0,85	1,60	0,21	98,81	columbita-(Fe)
Am12	61,28	9,46	7,60	6,16	14,66	1,04	0,07	100,02	ixiolita
Am13	58,17	11,25	7,83	5,98	15,83	0,56	0,03	99,49	ixiolita
Am14	31,98	46,78	13,08	6,52	0,69	1,20	0,02	100,19	columbita-(Fe)
Am15	41,40	37,03	11,39	7,00	0,73	1,27	0,05	98,85	tantalita-(Fe)
Am16a	50,64	27,97	11,97	4,92	1,55	2,21	0,07	99,19	tantalita-(Fe)
Am16b	52,00	24,23	11,31	4,65	4,08	1,99	0,05	98,01	tantalita-(Fe)
Am17a	38,19	40,36	12,24	6,13	0,88	1,45	0,06	99,50	columbita-(Fe)
Am17b	58,60	11,07	8,25	4,92	13,69	3,15	0,04	99,70	ixiolita
Am18a	57,00	23,22	10,69	6,19	0,87	1,22	0,00	98,96	tantalita-(Fe)
Am18b	57,67	11,40	8,80	4,96	14,66	2,07	0,02	99,61	ixiolita
Am19	50,96	27,23	12,00	5,42	1,25	1,84	0,05	98,58	tantalita-(Fe)
Am20a	18,57	58,73	14,88	6,97	0,77	1,46	0,13	101,24	columbita-(Fe)
Am20b	49,46	29,13	11,84	5,27	1,34	1,69	0,07	98,78	tantalita-(Fe)
Am21a	56,98	23,75	10,93	6,09	0,60	1,17	0,08	99,47	tantalita-(Fe)
Am21b	57,19	11,75	9,05	4,29	15,08	2,85	0,06	100,10	ixiolita
Am22a	52,87	14,43	9,14	4,59	15,35	1,30	0,02	97,76	ixiolita
Am22b	57,23	11,24	9,23	4,44	13,96	3,40	0,04	99,31	ixiolita
Am23	59,43	12,21	7,90	6,24	11,40	1,43	0,09	98,60	ixiolita
Am24	57,58	14,02	8,45	6,02	11,24	1,32	0,09	98,75	ixiolita

As análises mostraram uma forte variação nos teores de Ta, Nb e Sn, a qual foi notada inclusive em um mesmo grão. A variação dos óxidos de tais elementos é representada no diagrama ternário da Figura 5.1A. As composições das amostras analisadas também foram plotadas no diagrama quadrilateral da columbita (Fig. 5.1B); a fase tantalita-(Fe) representa 32% do total de amostras de Nb-tantalatos analisadas, a fase columbita-(Fe) 29%, tantalita-(Mn) 3%, e ixiolita 36%.

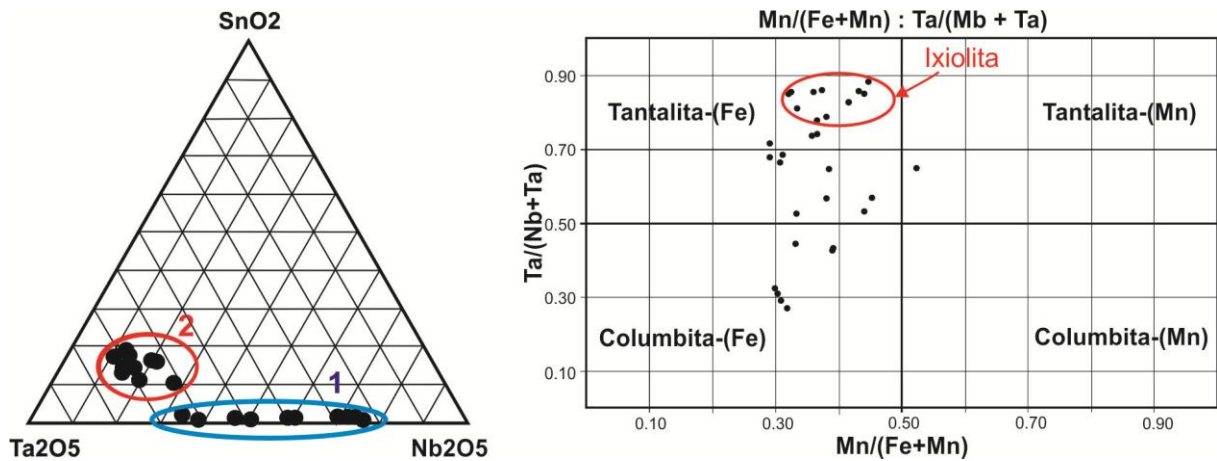


Figura 5.1 – A. Diagrama ternário mostrando conteúdos relativos de Ta₂O₅, Nb₂O₅ e SnO₂. O grupo 1 representa composições de columbita-tantalita, enquanto o grupo 2 mostra uma fase mais rica em Sn, revelada como ixiolita. B. Diagrama quadrilateral da columbita, mostrando a posição das amostras analisadas na solução sólida.

Para demonstrar a variação de composição, e conseqüentemente de coloração em um mesmo grão, foram obtidas imagens de elétrons retroespalhados (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4). Em tais imagens, quanto maior o número atômico médio da fase, mais clara sua imagem aparece. Como o número atômico do Ta (73) é maior que o do Nb (41), as fases com maiores proporções de Ta em relação ao Nb possuem cores mais claras nas imagens. As análises dos grãos da Figura 5.2 a 5.4 são apresentadas nas Tabelas 5.5 a 5.7.

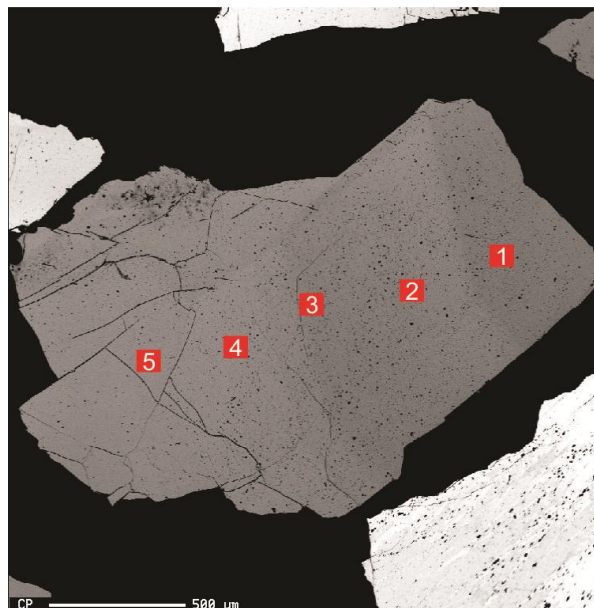


Figura 5.2 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am3 – columbita-(Fe), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.

Tabela 5.5 – Análises com microsonda eletrônica em amostra de columbita-(Fe) Am3 com diferentes intensidades de cor (todo Fe como FeO).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Espécie
Am3/1	20,57	55,42	13,72	6,22	0,89	1,75	0,23	98,81	columbita-(Fe)
↓	21,46	55,25	13,95	5,97	0,72	1,81	0,02	99,17	columbita-(Fe)
↓	22,25	54,25	14,34	5,81	0,92	1,85	0,10	99,51	columbita-(Fe)
↓	22,56	54,68	13,32	5,69	0,85	1,71	0,06	98,87	columbita-(Fe)
Am3/5	24,12	53,18	13,76	5,87	0,88	1,95	0,00	99,77	columbita-(Fe)

As análises da amostra Am3 (Figura 5.2) apresentaram valores bastante próximos, embora a parte mais clara (ponto 5) possua um teor de Ta ligeiramente maior. Uma graduação de cor pode ser notada (mais clara para mais escura, da esquerda para a direita) e a variação composicional é confirmada nas análises da Tabela 5.5. A Figura 5.3 mostra um intercrescimento de ixiolita (parte mais clara) e tantalita-(Fe) (parte mais escura), conforme a Tabela 5.6.

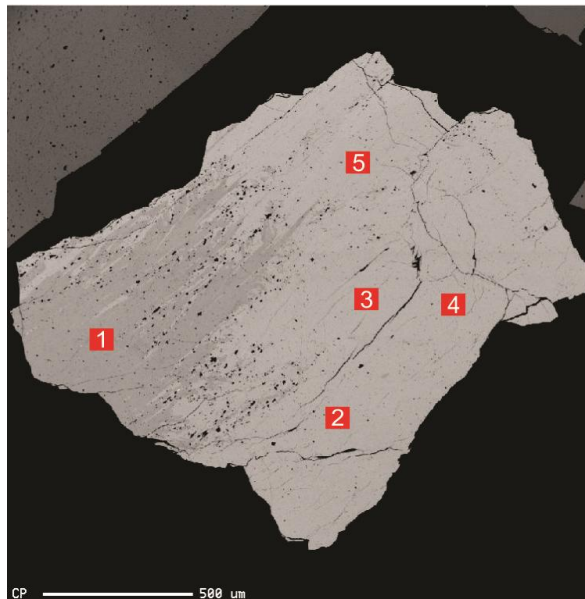


Figura 5.3 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am7 (tantalita-(Fe) + ixiolita), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.

Tabela 5.6 – Análises com microsonda eletrônica de diferentes fases relacionadas a diferenças de cor na amostra Am7 (todo Fe como FeO; análise da parte clara é uma média de 4 pontos: 2, 3, 4 e 5).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Espécie
Parte escura	48,38	29,81	10,73	6,60	1,61	1,89	0,71	99,73	tantalita-(Fe)
Parte clara	52,62	17,52	8,85	5,12	13,51	1,30	0,07	98,99	ixiolita

Uma diferença composicional também pode ser observada através da variação de cor na Figura 5.4. A Tabela 5.7 mostra as análises da amostra Am9 (análise do ponto 1 foi descartada por ter sido considerada errônea). Os pontos 4, 5 e 6 apresentaram altos teores de Sn, exatamente onde os valores de Ta_2O_5 são mais altos; o conteúdo de Fe diminui junto com o de Nb_2O_5 .

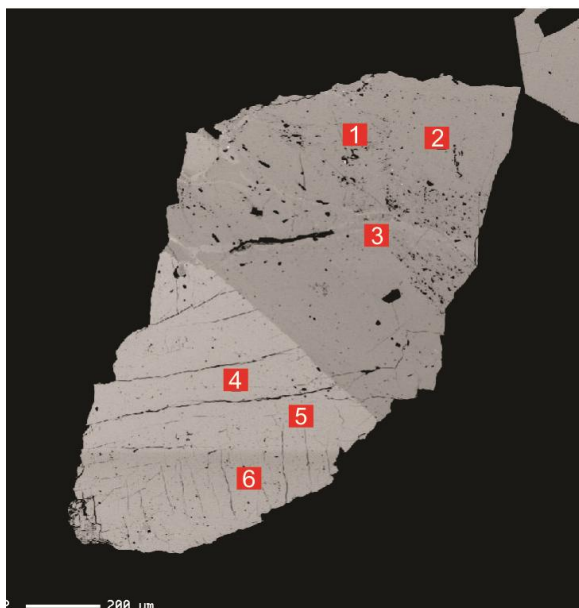


Figura 5.4 – Imagem de elétrons retroespalhados da amostra Am9 (tantalita-(Fe) + ixiolita), mostrando diferenças na intensidade de cor e na composição química.

Tabela 5.7 – Análises com microsonda eletrônica de diferentes intensidades de cor (e composições químicas) na amostra Am9 (todo Fe como FeO).

	Ta_2O_5	Nb_2O_5	FeO	MnO	SnO_2	TiO_2	UO_2	Total	Espécie
Am9 - 2	47,34	30,41	10,95	6,34	2,13	1,94	0,42	99,53	tantalita-(Fe)
Am9 - 3	47,81	30,37	10,54	7,11	1,25	2,11	0,17	99,36	tantalita-(Fe)
Am9 - 4	53,02	16,59	8,84	5,41	14,21	1,27	0,07	99,41	ixiolita
Am9 - 5	53,48	16,66	9,02	5,64	13,64	1,25	0,07	99,75	ixiolita
Am9 - 6	53,59	17,31	8,77	5,40	12,91	1,32	0,03	99,33	ixiolita

6 ANÁLISES POR ESPECTROSCOPIA DE MASSA (ICP-MS)

Conquanto a microsonda eletrônica não se tenha mostrado eficiente para detectar possíveis anomalias químicas, espodumênios e feldspatos (albita e microclínio) também foram submetidos a análises por espectroscopia de massa (ICP-MS). Tais análises foram efetuadas no Laboratório SGS-GEOSOL, em Vespasiano (MG), para determinação dos teores de elementos maiores, menores, traços e terras-raras. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.1 a 6.6 (resultados completos no Anexo IV).

Tabela 6.1 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos maiores e menores em espodumênios dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: Ur, Urucum (kunzita); Ca1, Cachoeira (“industrial”); Ca2, Cachoeira (verde escuro); Ne, Neves (gemológico verde); Ch, Chapadinha (gemológico verde amarelado); SR1, Santa Rosa (rosado não gemológico); SR2, Santa Rosa (alterado, “palmito”) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em % em peso; LOI = perda ao fogo; todo Fe como Fe₂O₃).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	MnO	Cr ₂ O ₃	LOI	Total	Li ₂ O
Ur	67,65	27,71	1,25	0,28	0,11	<0,01	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	97,08	10,63
Ca1	67,83	27,23	1,76	0,02	0,16	<0,01	<0,01	0,09	<0,01	<0,01	97,09	>10,76
Ca2	68,14	27,48	1,63	0,02	0,14	<0,01	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	97,48	>10,76
Ne	66,32	26,73	1,82	0,02	0,11	0,02	<0,01	0,05	<0,01	0,14	95,07	>10,76
Ch	66,04	26,47	2,76	0,48	0,13	0,01	0,01	0,10	<0,01	<0,01	96,00	>10,76
SR1	67,22	27,86	1,39	0,03	0,10	<0,01	0,02	0,04	<0,01	0,24	96,66	10,66
SR2	62,94	30,02	0,73	<0,01	0,06	0,02	0,16	0,03	<0,01	4,98	93,98	7,30

Entre os elementos maiores, tais espodumênios mostram composições químicas bastante diferenciadas da fórmula ideal. O espodumênio "palmito" da lavra Santa Rosa apresenta os maiores conteúdos de Al₂O₃, MgO, P₂O₅, K₂O e LOI, e os menores conteúdos de SiO₂, Fe₂O₃, MnO, Na₂O, TiO₂ e Li; pelo alto valor da perda ao fogo, processos de alteração expressivos provavelmente ocorreram. Associando-se tal anomalia em elementos voláteis com as observações de campo, que ressaltaram a “fibrolização” não só do espodumênio como também das elbaítas, pode-se evidenciar a existência de processos hidrotermais atuando nesse corpo. Entre os elementos menores, deve ser destacado que o cromo foi analisado, porém não foi detectado.

Tabela 6.2 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos traços em espodumênios dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: Ur, Urucum (kunzita); Ca1, Cachoeira (“industrial”); Ca2, Cachoeira (verde escuro); Ne, Neves (gemológico verde); Ch, Chapadinha (gemológico verde amarelado); SR1, Santa Rosa (rosado não gemológico); SR2, Santa Rosa (alterado, “palmito”) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em ppm).

	Ba	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Mo	Nb	Ni	Rb
Ur	<10	0,8	0,15	<5	82,7	0,39	<2	2,73	6	0,3
Ca1	<10	0,5	2,09	<5	70,3	0,26	<2	0,81	<5	1,5
Ca2	<10	<0,5	0,45	<5	78,5	0,71	<2	10,77	<5	0,3
Ne	<10	0,7	<0,05	<5	61,0	0,16	<2	0,67	<5	<0,2
Ch	<10	1,6	0,20	<5	77,8	0,74	<2	5,27	7	1,4
SR1	<10	0,5	5,85	<5	65,5	0,66	<2	0,80	<5	2,2
SR2	<10	<0,5	51,28	<5	78,8	0,40	<2	3,30	<5	62,3

	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	W	Zn	Zr
Ur	72,1	<10	<0,05	0,2	<0,5	0,06	0,4	<5	<10
Ca1	65,0	<10	0,17	0,2	<0,5	0,13	2,8	16	<10
Ca2	43,0	<10	<0,05	1,2	<0,5	<0,05	<0,1	12	<10
Ne	137,1	<10	<0,05	0,2	<0,5	0,09	0,3	<5	<10
Ch	56,4	<10	0,31	0,7	<0,5	0,20	0,4	17	17
SR1	287,0	<10	2,05	0,4	<0,5	<0,05	0,3	6	<10
SR2	475,7	<10	3,92	0,3	<0,5	0,22	0,8	10	<10

Deve-se observar que, pelos fechamentos gerais das análises muito altos (~96-97%), levando-se em conta a não contabilização do lítio, isso pode representar erro analítico expressivo e, assim, limitar a confiabilidade das mesmas. Os valores muito elevados de lítio podem ser devidos a conteúdos próximos do limite superior de detecção. Quanto aos elementos traços, destacam-se: (1) as anomalias (positivas) em Cs, Rb e Sn no Pegmatito Santa Rosa, bem como as anomalias (negativas) dos dois primeiros elementos principalmente no Pegmatito Neves; (2) os valores de Nb relativamente altos no espodumênio verde amarelado da lavra da Cachoeira, e seu “par” Ta desprezível nesta mesma amostra, além de Urucum e Neves.

Tabela 6.3 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos terras-raras em espodumênios dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: Ur, Urucum (kunzita); Ca1, Cachoeira (“industrial”); Ca2, Cachoeira (verde escuro); Ne, Neves (gemológico verde); Ch, Chapadinha (gemológico verde amarelado); SR1, Santa Rosa (rosado não gemológico); SR2, Santa Rosa (alterado, “palmito”) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em ppm).

	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu
Ur	3,0	0,50	0,29	0,05	0,54	0,10	7,9	<0,05
Ca1	2,0	0,15	0,07	<0,05	0,21	<0,05	4,9	<0,05
Ca2	1,6	0,17	0,09	<0,05	0,21	<0,05	2,8	<0,05
Ne	1,8	0,23	0,10	<0,05	0,30	<0,05	4,4	<0,05
Ch	13,7	2,63	1,55	0,28	1,91	0,60	11,1	0,12
SR1	1,7	0,27	0,14	<0,05	0,36	0,05	4,3	<0,05
SR2	1,4	0,17	0,08	<0,05	0,18	<0,05	4,7	<0,05

	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb
Ur	3,1	0,92	0,5	0,08	<0,05	2,93	0,2
Ca1	1,7	0,51	0,2	<0,05	<0,05	0,90	<0,1
Ca2	1,1	0,37	0,2	<0,05	<0,05	0,93	<0,1
Ne	2,3	0,72	0,3	<0,05	<0,05	1,25	<0,1
Ch	7,5	2,11	1,2	0,38	0,21	15,14	1,0
SR1	2,2	0,65	0,3	0,07	<0,05	1,72	0,1
SR2	1,7	0,52	0,2	<0,05	<0,05	0,88	<0,1

Tabela 6.4 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos maiores e menores em feldspatos dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: MUr, Urucum (microclínio); MCa, Cachoeira (microclínio); MCh, Chapadinha (microclínio); MSR, Santa Rosa (microclínio); AUr, Urucum (albita); ACa, Cachoeira (albita); ANe, Neves (albita); ASR, Santa Rosa (albita) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em %; LOI = perda ao fogo; todo Fe como Fe₂O₃).

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	K ₂ O	MnO	Li ₂ O	Cr ₂ O ₃	LOI	Total
MUr	66,20	18,48	0,37	<0,01	2,43	0,11	12,59	<0,01	0,22	<0,01	0,51	100,72
MCa	66,37	19,11	0,41	<0,01	2,31	0,30	13,34	<0,01	0,66	<0,01	0,50	102,43
MCh	64,31	18,26	0,48	0,02	1,88	0,30	12,77	<0,01	0,51	<0,01	0,56	98,63
MSR	65,88	19,85	0,59	<0,01	2,58	0,74	12,63	<0,01	0,59	<0,01	0,57	102,92
AUr	69,21	19,85	0,63	0,02	11,40	0,08	0,28	<0,01	0,07	<0,01	0,27	101,73
ACa	68,70	20,04	0,42	<0,01	11,07	0,40	0,30	<0,01	0,15	<0,01	0,47	101,42
ANe	69,15	18,61	0,44	<0,01	11,22	0,32	0,21	<0,01	0,07	<0,01	0,74	100,71
ASR	68,67	19,73	0,60	<0,01	11,08	0,14	0,38	<0,01	<0,01	<0,01	0,35	100,95

Segundo Correia Neves (1981), os feldspatos potássicos estão entre as fases mais adequadas para seguir as variações geoquímicas do sistema pegmatítico durante a cristalização das zonas primárias. Isto se dá devido ao fato de os elementos Rb e Ba estarem intimamente associados ao K, e terem comportamento peculiar no sistema pegmatítico. O Rb mostra tendência a enriquecer-se nos minerais com K formados mais tardiamente no processo da cristalização pegmatítica, e o Ba mostra um comportamento inverso ao do Rb. Assim, as

razões K/Rb e Ba/Rb são adequadas para caracterizar a cristalização fracionada dentro de um corpo magmático de natureza granítica.

Tabela 6.5 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos traços em feldspatos dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: MUr, Urucum (microclínio); MCa, Cachoeira (microclínio); MCh, Chapadinha (microclínio); MSR, Santa Rosa (microclínio); AUr, Urucum (albita); ACa, Cachoeira (albita); ANe, Neves (albita); ASR, Santa Rosa (albita) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em ppm).

	Ba	Co	Cs	Cu	Ga	Hf	Mo	Nb	Ni	Rb
MUr	<10	<0,50	214,52	<5	11,60	<0,05	<2	0,16	<5	907,2
MCa	33	<0,50	144,21	<5	17,80	<0,05	<2	0,37	<5	2429,4
MCh	53	<0,50	229,66	<5	15,00	<0,05	<2	2,03	<5	1885,0
MSR	<10	<0,50	119,39	<5	15,80	<0,05	<2	0,64	<5	1743,1
AUr	<10	<0,50	8,92	<5	24,10	0,16	<2	1,11	<5	38,7
ACa	<10	<0,50	8,13	<5	24,90	0,10	<2	3,41	<5	59,5
ANe	<10	0,55	6,60	<5	21,65	0,13	<2	12,13	<5	28,9
ASR	<10	<0,50	4,63	<5	23,70	<0,05	<2	0,18	<5	19,9

	Sn	Sr	Ta	Th	Tl	U	W	Zn	Zr
MUr	5,6	<10	<0,05	<0,1	4,0	0,14	0,20	9	<10
MCa	6,8	55	<0,05	<0,1	10,8	<0,05	0,90	<5	<10
MCh	14,9	25	2,04	<0,1	11,2	<0,05	0,70	<5	<10
MSR	20,0	15	<0,05	<0,1	5,5	1,00	0,50	5	<10
AUr	5,8	<10	11,79	<0,1	1,1	0,18	0,70	<5	<10
ACa	15,4	18	5,96	0,4	<0,5	1,06	0,30	<5	<10
ANe	99,9	<10	16,41	<0,1	<0,5	0,33	0,35	<5	<10
ASR	0,9	<10	<0,05	<0,1	<0,5	0,09	0,20	<5	<10

Tabela 6.6 – Análises químicas por espectroscopia de massa (ICP-MS) de elementos terras-raras em feldspatos dos pegmatitos estudados. Pegmatitos: MUr, Urucum (microclínio); MCa, Cachoeira (microclínio); MCh, Chapadinha (microclínio); MSR, Santa Rosa (microclínio); AUr, Urucum (albita); ACa, Cachoeira (albita); ANe, Neves (albita); ASR, Santa Rosa (albita) (Laboratório SGS-GEOSOL; dados em ppm).

	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu
MUr	1,0	0,17	0,06	<0,05	0,25	<0,05	3,4	<0,05
MCa	0,8	0,08	<0,05	<0,05	0,13	<0,05	2,3	<0,05
MCh	2,3	0,33	0,15	0,08	0,48	0,05	5,8	<0,05
MSR	1,5	0,12	<0,05	<0,05	0,16	<0,05	2,8	<0,05
AUr	1,4	0,13	0,09	<0,05	0,17	<0,05	4,0	<0,05
ACa	0,8	0,07	<0,05	<0,05	0,11	<0,05	2,2	<0,05
ANe	1,9	0,21	0,13	0,07	0,33	<0,05	5,3	<0,05
ASR	1,3	0,16	0,09	<0,05	0,22	<0,05	4,6	<0,05

	Nd	Pr	Sm	Tb	Tm	Y	Yb
MUr	1,8	0,55	0,3	<0,05	<0,05	0,94	<0,1
MCa	1,2	0,31	0,1	<0,05	<0,05	0,63	<0,1
MCh	3,2	1,02	0,5	0,07	<0,05	1,82	0,1
MSR	1,4	0,45	0,2	<0,05	<0,05	0,68	<0,1
AUr	1,3	0,38	0,2	<0,05	<0,05	0,83	<0,1
ACa	0,8	0,24	<0,1	<0,05	<0,05	0,45	<0,1
ANe	3,0	0,89	0,4	<0,05	<0,05	1,01	<0,1
ASR	1,7	0,53	0,2	<0,05	<0,05	1,01	<0,1

Os feldspatos analisados possuem teores aproximados de Al_2O_3 e SiO_2 . Alguns microclínios mostram enriquecimento considerável em Cs (119 a 230 ppm) e Rb (907 a 2430 ppm), provavelmente demonstrando uma maior diferenciação dos pegmatitos Urucum, Cachoeira, Chapadinha e Santa Rosa. Nenhuma das amostras analisadas apresenta teores anômalos de elementos terras-raras.

Os conteúdos de elementos terras-raras foram plotados em diagramas com escalas logarítmicas (Figuras 6.1 e 6.2), normalizados a condritos segundo padrão de Haskin et al. (1968).

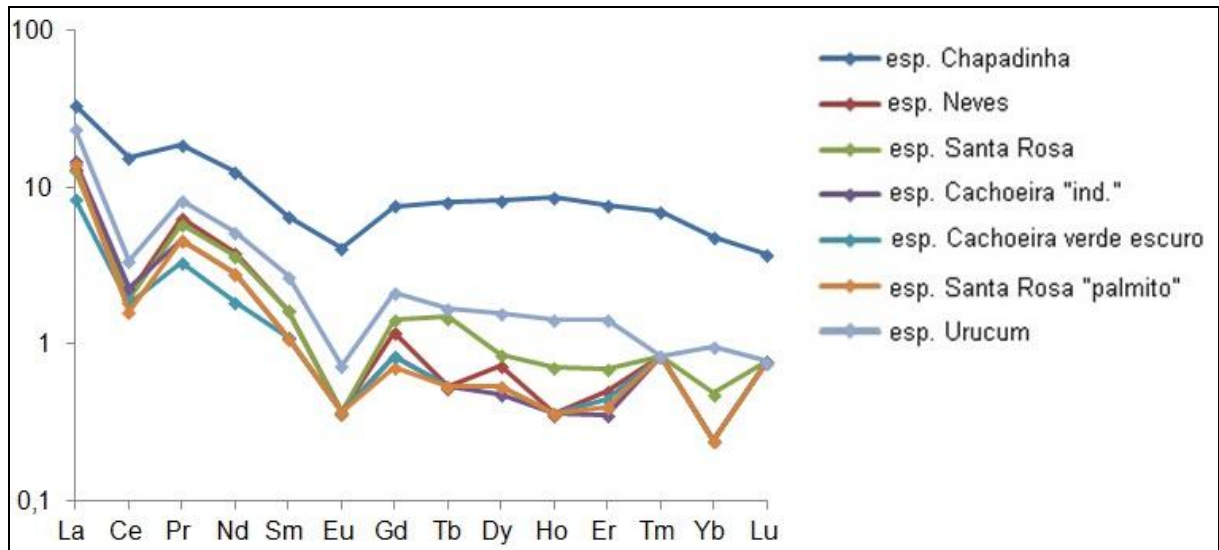


Figura 6.1 – Conteúdos de terras-raras em espodumênios analisados.

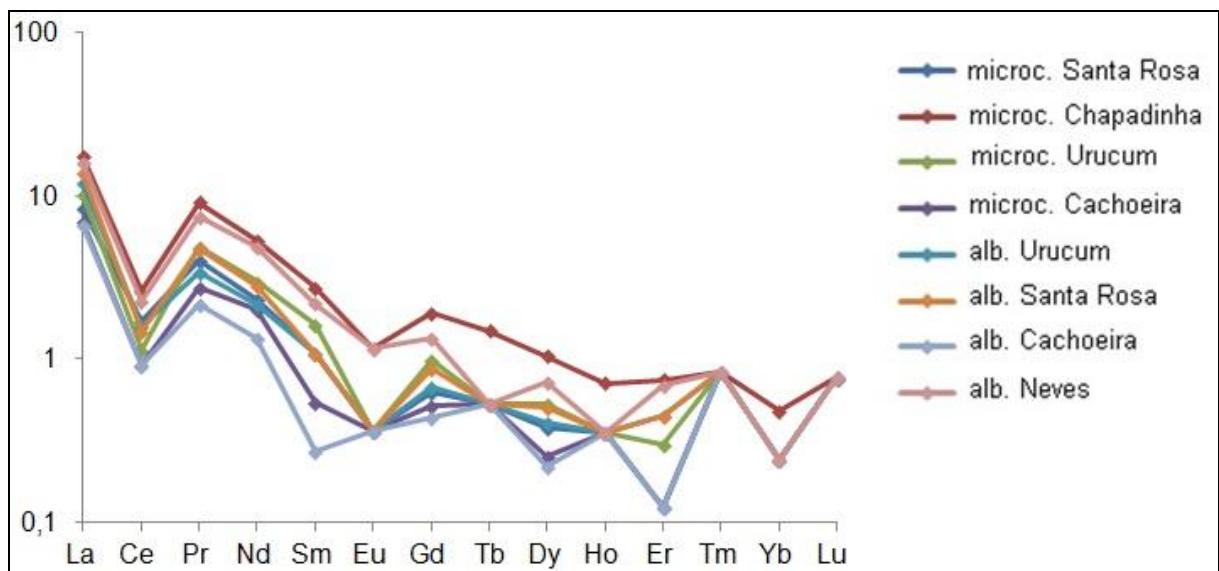


Figura 6.2 – Conteúdos de terras-raras em feldspatos analisados.

A partir dos diagramas apresentados, pode ser percebido um conteúdo de terras-raras expressivamente mais elevado para o espodumênio da lavra Chapadinha. O microclínio desta mesma lavra também apresenta alguns valores mais elevados (Gd, Tb, Dy, Ho e Yb), porém de modo mais acanhado. No geral, são notadas algumas anomalias negativas, principalmente em Ce e Eu, para todas as amostras analisadas, e em Yb para os espodumênios da lavra Santa Rosa e para os feldspatos das lavras de Neves e Chapadinha. O microclínio da mina da Cachoeira apresenta ainda anomalias negativas em Sm e Er.

7 ANÁLISES DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – ESTUDO DAS CAUSAS DE COR

7.1 Aspectos gerais

A ressonância paramagnética eletrônica (EPR) é uma técnica amplamente utilizada tanto em experimentos na área de física da matéria condensada quanto em química, biofísica e mineralogia, dentre outras áreas. Trata-se da absorção ressonante de radiação eletromagnética na faixa de microondas, na presença de um campo magnético estático, por sistemas que apresentam um spin eletrônico efetivo não nulo, como é o caso, por exemplo, dos íons de terras-raras e metais de transição, dos radicais livres em líquidos e sólidos, dos defeitos pontuais em sólidos (como centros de cor ou átomos intersticiais) e, enfim, de todos os sistemas que contenham elétrons desemparelhados. Esta técnica é uma das mais poderosas na identificação de defeitos paramagnéticos em sólidos. Isto se deve ao fato de que o espectro de EPR possui informações detalhadas sobre a estrutura eletrônica dos defeitos como sua simetria local, dada pelo arranjo dos átomos ou íons na vizinhança próxima, e a distribuição da densidade de spin (Spaeth, 1992).

7.2 Análises pertinentes

As principais causas de cor nas gemas são impurezas (defeitos cromóforos, ex. V, Fe, Cr e Mn) e imperfeições (centros de cor intrínsecos) como vacâncias na rede cristalina. Atualmente considera-se mais adequado utilizar o termo centros de cor para definir tanto impurezas cromóforas quanto os centros intrínsecos responsáveis pela cor nos cristais. Em geral, os centros de cor podem ser criados através de irradiação de alta energia (natural ou artificial) e destruídos através de aquecimento. No estudo das causas de cores, são empregadas as técnicas de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) e absorção ótica em amostras naturais e em amostras com irradiação gama de alta dosagem.

Diversos estudos têm procurado explicar as cores dos espodumênios, principalmente das kunzitas, seja por análises de EPR (Holy, 1968; Ito & Isotani, 1991; Dias et al., 2000; Dias, 2002), seja por análises de ativação com nêutrons (Stasiulevicius & Franco, 1969; Isotani et al., 1991; Stasiulevicius et al., 2000). Estudos sobre as hiddenitas verdadeiras, norte-americanas, são mais limitados (Webster, 1975).

Ito & Isotani (1991) e Dias (2002) atribuíram a cor lilás da kunzita ao centro Mn^{4+} e refutaram uma relação do centro Mn^{2+} ; a cor verde da kunzita criada por irradiação pode estar relacionada ao Mn^{3+} , sendo o Mn^{4+} considerado como o seu precursor. Tal variação pode ser explicada por uma possível conversão do Mn^{3+} para o Mn^{4+} , através do processo de óxido-redução com o Fe^{3+} sob irradiação (Nassau, 1975), resultando em Fe^{2+} , isto é: $Mn^{3+} + Fe^{3+} \rightarrow Mn^{4+} + Fe^{2+}$.

A cor da hiddenita foi atribuída ao centro Cr^{3+} , apesar de não ter sido possível atribuir linhas de EPR a esse centro (Dias, 2002). Já com relação ao espodumênio amarelo/verde amarelado, não se conseguiu estabelecer com certeza um centro causador da cor, mas supôs-se que ela poderia ser atribuída ao Fe^{3+} . Por este motivo, no âmbito do presente trabalho foram analisados apenas espodumênios verde amarelados.

As medidas de EPR foram realizadas no Laboratório de Ressonância Magnética do Departamento de Física, localizado no Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a partir de amostras pulverizadas de espodumênios gemológicos dos pegmatitos de Neves, Chapadinha e Cachoeira. As amostras foram submetidas a irradiação por raios gama, em doses de 200 kGy, com o que obteve-se as linhas de EPR. Em seguida, as amostras passaram por tratamento térmico, em intervalos de 50° C a partir de 250° C até 450° C por 10 minutos cada, medindo-se o sinal de EPR para cada etapa. Os resultados estão compilados nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3.

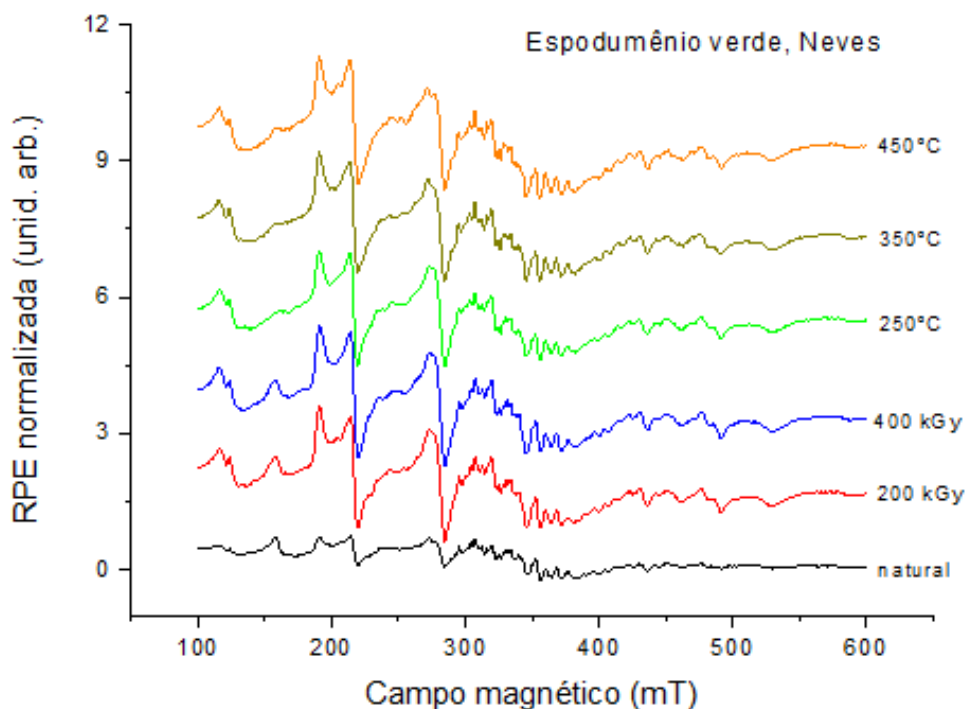


Figura 7.1 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde gemológico do pegmatito de Neves, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C por 10 minutos cada (as linhas referentes aos tratamentos de 300 e 400°C foram omitidas para melhor visualização dos resultados).

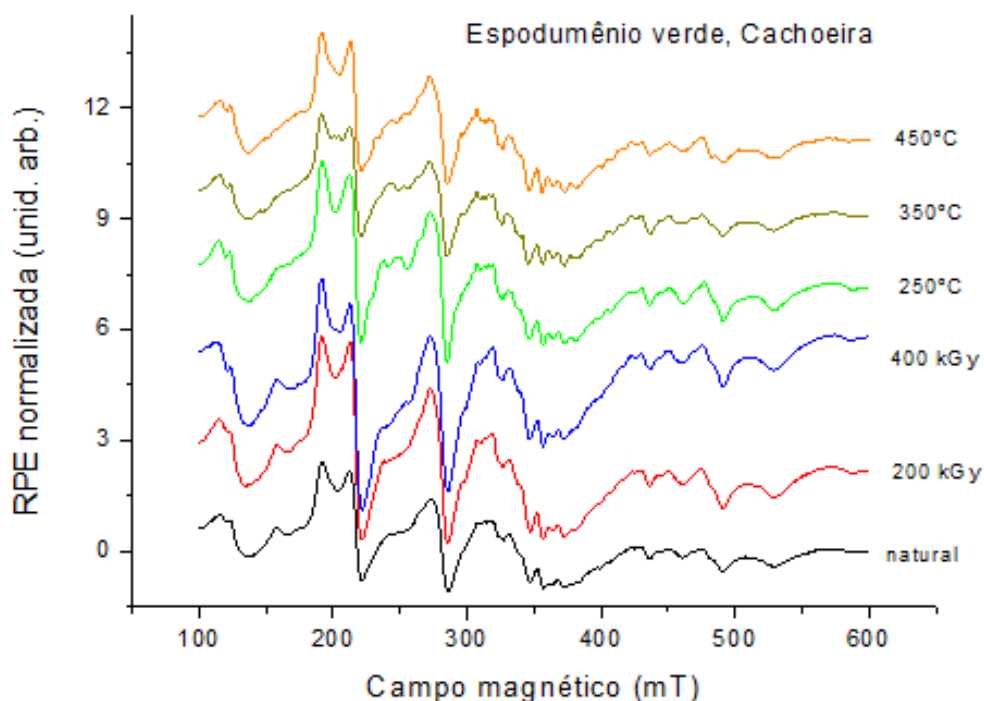


Figura 7.2 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde amarelado gemológico da mina da Cachoeira, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C por 10 minutos cada (as linhas referentes aos tratamentos de 300 e 400°C foram omitidas para melhor visualização dos resultados).

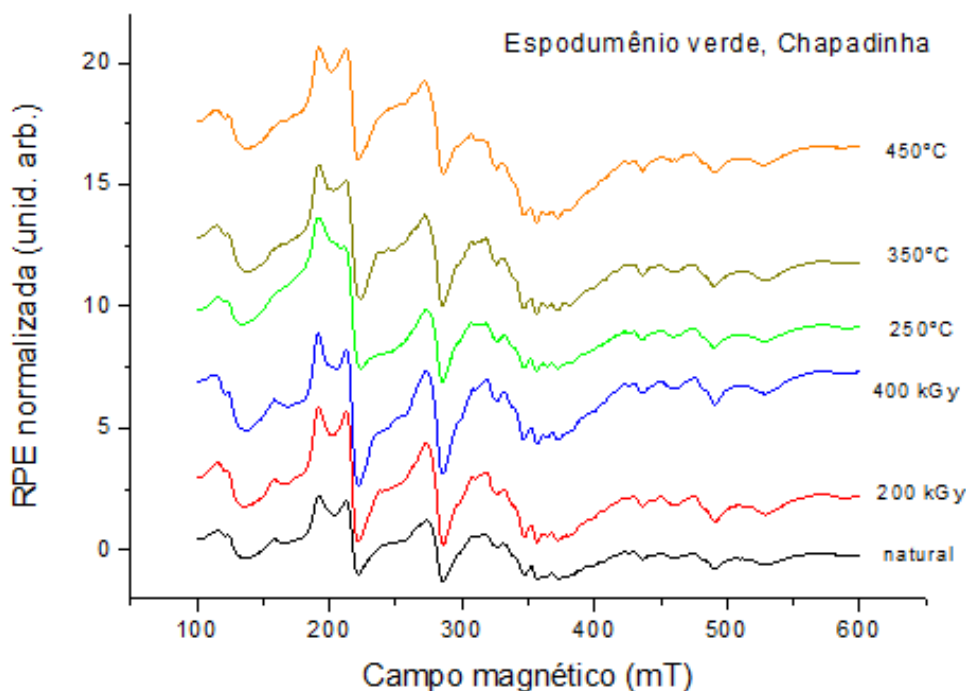


Figura 7.3 – Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de espodumênio verde amarelado gemológico do pegmatito da Chapadinha, natural, irradiado a 200 kGy, reirradiado, e submetido a tratamento térmico entre 250°C e 450°C por 10 minutos cada (as linhas referentes aos tratamentos de 300 e 400°C foram omitidas para melhor visualização dos resultados).

Após irradiação de 200 kGy, todas as amostras apresentaram intensificação dos sinais, ocorrendo uma intensificação um pouco menor após a segunda irradiação a 200 kGy (cumulativo de 400 kGy). Todas as linhas mais largas nos espectros podem ser atribuídas ao íon Fe^{3+} em sítios de Al (conforme Dias, 2002). As linhas mais finas na região do campo magnético de aproximadamente 350 mT correspondem ao íon Mn^{2+} . O aumento da intensidade das linhas largas após irradiação indica que a concentração de Fe^{3+} aumenta com a irradiação gama mais fortemente até a dose de 200 kGy e somente um pouco mais até 400 kGy. Cristais de espodumênio verde amarelado destes locais também foram submetidos a irradiação, e observou-se uma intensificação da tonalidade amarela. Assim, pode-se pressupor que a componente amarela da cor dos espodumênios seja causada pelo Fe^{3+} .

Tratamentos térmicos indicam que a concentração de Fe^{3+} se mantém estável até tratamentos a 450°C, sendo também a cor mantida sob tais condições. Comparando as amostras Neves, Chapadinha e Cachoeira, observa-se um aumento na concentração do Fe^{3+} com a irradiação gama por um fator de 4, 2 e 2, respectivamente.

8 ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO ÓTICA

8.1 Aspectos gerais

Em termos óticos, as cores nos minerais são causadas pela combinação dos comprimentos de onda transmitidos ou refletidos, que não foram absorvidos pelo material. O instrumento chamado espectrômetro de absorção é capaz de medir o fenômeno denominado absorção seletiva, que consiste da absorção de determinados comprimentos de onda do espectro ótico devido às transições eletrônicas internas de metais de transição, de transições de tipo transferência de carga entre metais ou entre metais e ligante, além de transições internas de vacâncias aprisionadoras de elétrons. O resultado final deste tipo de análise é o chamado espectro de absorção ou vales de transmissão. A posição e intensidade destas bandas são determinadas pela natureza do centro de cor ou metal de transição, e pela simetria e intensidade do campo cristalino (Burns, 1993).

8.2 Análises pertinentes

Com o objetivo de auxiliar no estudo das causas de cores, foram realizadas medidas de absorção na região do ultravioleta, visível e do infravermelho próximo (Figuras 7.1, 7.2 e 7.3), em amostras de espodumênio gemológico verde/verde amarelado, medidas também feitas no Departamento de Física da UFMG.

Para realização da técnica da absorção ótica, empregaram-se amostras com faces paralelas (dimensões de 3,0 x 3,0 x 1,0 mm) onde a faceta maior é paralela ao plano de clivagem do mineral. As amostras também foram submetidas a irradiação gama (200 kGy).

A Figura 8.1 mostra as diferentes tonalidades em espodumênios verdes dos Estados Unidos, da cidade de Hiddenite na Carolina do Norte, onde foram encontrados os primeiros espodumênios verdes (hiddenita, Figura 8.1A), e do Brasil da lavra de Neves, ora estudada (Figura 8.1B). As três amostras verdes de Neves (menores) são naturais, enquanto a amostra maior (de cima) foi irradiada, adquirindo uma tonalidade um pouco amarelada.



Figura 8.1 – A. Amostra de hiddenita dos Estados Unidos. B. Amostras de espodumênio verde de Neves (amostra superior – irradiada, amostras inferiores – naturais).

A Figura 8.2a representa o espectro de absorção da amostra da lavra de Neves. É observada a banda relativa ao Fe^{2+} (9.640 cm^{-1} ; $\sim 1,2 \text{ eV}$) na região do infravermelho próximo, que tem sido atribuída a transições eletrônicas do Fe^{2+} em sítios octaédricos no estado de spin alto ($S=2$), como por exemplo em berilos azuis e verdes (água marinhas) (Blak et al., 1982; Isotani et al., 1989; Isotani et al., 2010; Andersson, 2013). Uma única transição é permitida para o Fe^{2+} e ocorre entre os níveis de energia ${}^5\text{T}_{2g}$ e ${}^5\text{E}_g$, mas pode resultar em mais transições devido ao efeito Jahn-Teller (Burns, 1993). Como exemplo, podem ser citados: euclásio, berilo e turmalina, nos quais tal transição ocorre respectivamente em 11.630 cm^{-1} , 12.200 cm^{-1} e 14.500 cm^{-1} (Burns, 1993). Esta transição provavelmente não tem grande influência na cor dos espodumênios verdes.

No espectro de absorção ótica dos espodumênios verdes de Neves observam-se ainda várias outras transições óticas nas regiões do azul e ultravioleta próximo, com bandas finas que podem ser atribuídas a transições óticas de spin proibidas de Fe^{2+} e provavelmente Mn^{2+} .

A título de comparação, é apresentado na Figura 8.2b o espectro de absorção da hiddenita norte-americana, no qual podem ser observadas, além das transições óticas presentes do espodumênio verde amarelado brasileiro, bandas relativas ao Cr^{3+} em 14.490 e 16.130 cm^{-1} ($2,01$ e $2,85 \text{ eV}$), região do vermelho e do azul, respectivamente, resultando em sua cor verde mais forte. O elemento cromóforo é o Cr^{3+} em sítios M1 de Al do espodumênio (Cohen & Janezic, 1983). As duas bandas são geradas por absorção entre os níveis de energia 4A_{2g} para os níveis ${}^4\text{T}_{2g}$ e ${}^4\text{T}_{1g}$ em simetria octaédrica e são transições óticas permitidas. Adicionalmente, observa-se de modo frequente a transição ${}^4\text{A}_{2g}$ para ${}^2\text{E}_g$, que é uma transição

proibida de spin, encontrada como linha fina na borda da transição 4A2g para 4T2g e chamada de linha R1. A presença de cromo nesta hiddenita também é confirmada por fotoluminescência e por microsonda eletrônica.

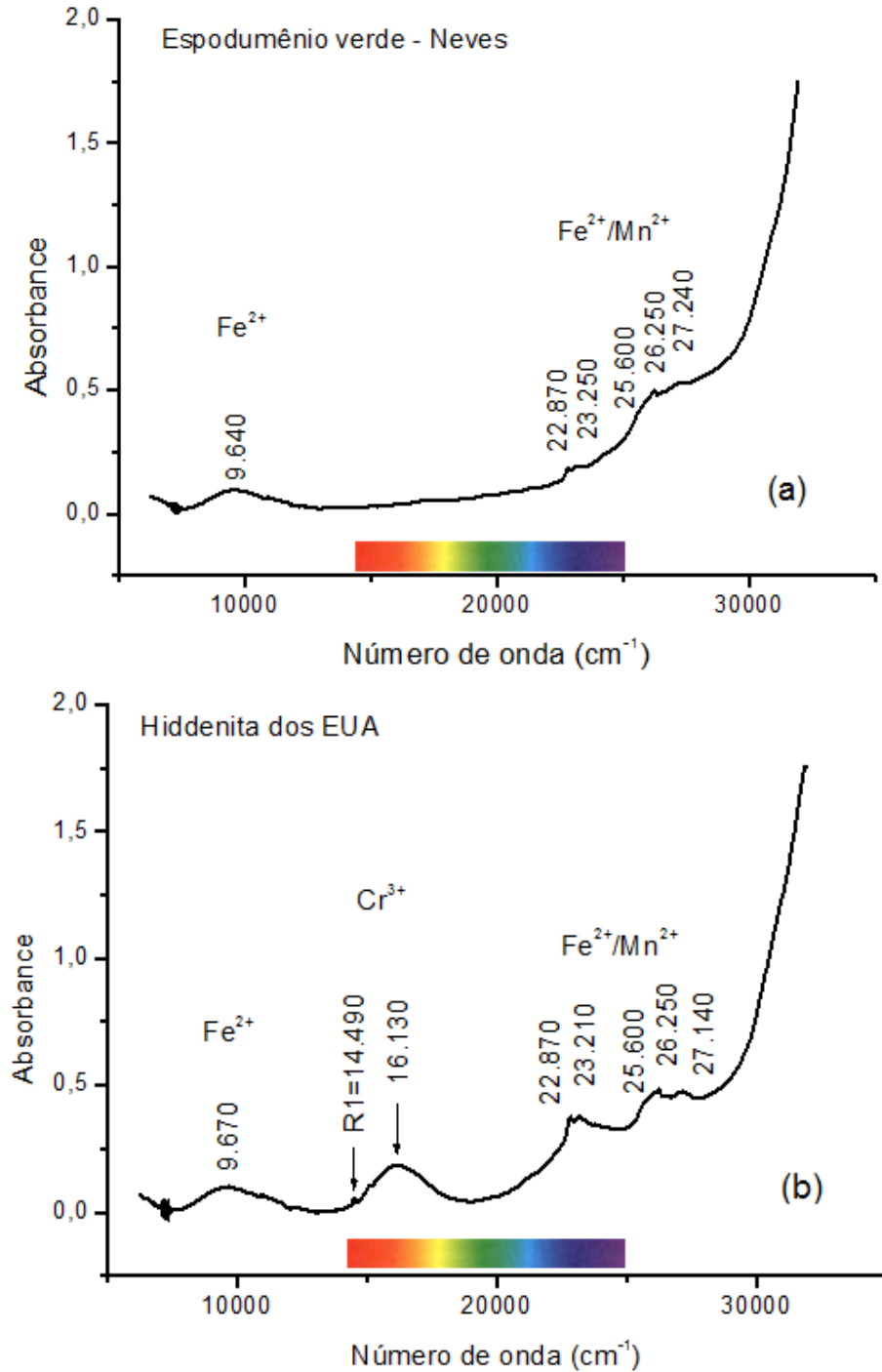


Figura 8.2 – Espectros de absorção de espodumênio verde gemológico: (a) da lavra de Neves; (b) dos Estados Unidos (hiddenita verdadeira).

A figura 8.3 mostra espectros de absorção óptica de espodumênios verde amarelados das lavras da Cachoeira e Chapadinha, antes e após irradiação gama com dose de 200 kGy. Ambas as amostras se tornaram mais amarelas com esse tratamento, devido à formação de uma banda de absorção larga na região do ultravioleta próximo, centrada em aproximadamente 27.500 cm^{-1} . Como os resultados da ressonância paramagnética eletrônica (EPR) indicam que houve um aumento na concentração de Fe^{3+} por irradiação, esta banda foi atribuída a transições MCT (*metal ligand charge transfer*) de Fe^{3+} para ligante O. Tratamentos térmicos até 450°C mantiveram a cor e o espectro de absorção. Esta banda é altamente permitida e, em geral, bem mais intensa inclusive do que as transições permitidas de spin de transições de campo cristalino. Por isso, é difícil concluir se a banda de Fe^{2+} na região do infravermelho está diminuindo com a irradiação, devido ao processo $\text{Fe}^{2+} + h\nu \rightarrow \text{Fe}^{3+} + e^-$.

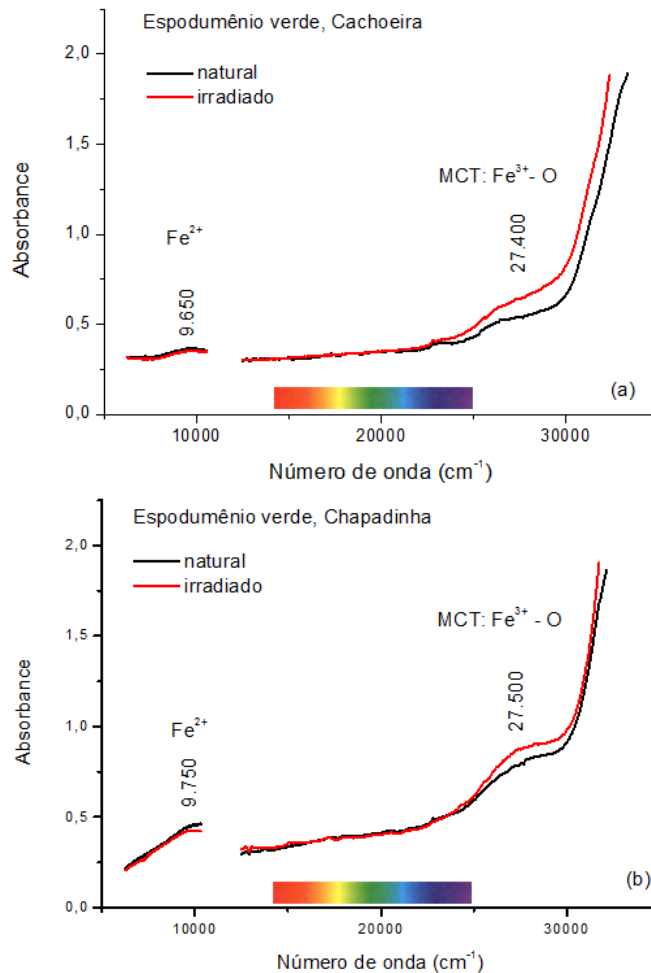


Figura 8.3 – Espectros de absorção de espodumênio verde amarelado gemológico, antes e após irradiação a 200 kGy: (a) da mina da Cachoeira; (b) da lavra da Chapadinha.

9 DISCUSSÕES GERAIS

Apresentam-se resumidas no Quadro 9.1 as principais características geológicas e mineralógicas dos sete pegmatitos com espodumênio estudados.

Quadro 9.1 – Principais características dos pegmatitos estudados (minerais principais: fds – feldspatos, qtz – quartzo, msc – muscovita, esp – espodumênio, ber – berilo, ctn – columbita-tantalita; tamanho (espessura), segundo Pedrosa-Soares et al., 2009: muito pequeno < 0,5 m; pequeno, 0,5 a 5 m; médio, 5 a 15 m; grande, 15 a 50 m; e muito grande, > 50 m de espessura).

Pegmatito/mina	Distrito/campo pegmatítico	Tamanho/Presença de zonamento	Mineralogia principal/acessória	Subclasse – Tipo/ subtipo	Rocha hospedeira	Tipo/tipologia de espodumênio presente
Cachoeira	Araçuaí/Itinga	Grande/não	fds, qtz, msc, esp / ber, ctn, esfalerita, ixiolita e litiofosfato	ELR-Li – albita-espodumênio/-	Xisto Formação Salinas	Industrial (primário); gemológico verde amarelado (hidrotermal) em menores quantidades
Chapadinha	Araçuaí/Itinga	Grande/sim	fds, qtz, esp, petalita / lepidolita, elbaíta	ELR-Li – complexo/petalita	Xisto Formação Salinas	Gemológico incolor a verde amarelado (hidrotermal)
Neves	Araçuaí/Itinga	Médio/não	qtz, albita caulinizada, esp/ ctn, cassiterita, elbaíta	ELR-Li – complexo/espodumênio	Xisto Formação Salinas	Gemológico incolor a verde (hidrotermal)
Santa Rosa	São José da Safira	Pequeno/sim	fds, qtz, msc / esp, ber, elbaíta, lepidolita	ELR-Li – complexo/elbaíta	Xisto Formação São Tomé	Industrial branco a rosado (primário), alterado (“palmito” - hidrotermal tardio)
Urucum	Conselheiro Pena	Grande/sim	fds, qtz, msc / esp, ber, schorlita, uraninita, loellingita, stockesita	ELR-Li – complexo/espodumênio	Xisto Formação São Tomé, no contato com a intrusão do Granito Urucum	Industrial (primário) e kunzita (hidrotermal)
Jairo Linguixa	Conselheiro Pena	Grande/sim	fds, qtz, msc / esp, ber, elbaíta, schorlita	ELR-Li – complexo/espodumênio	Xisto Formação São Tomé	Gemológico rosa (kunzita - hidrotermal)
Sapucaia	Conselheiro Pena	Grande/sim	fds, qtz, msc / ber, esp, trifilita, montebrasita, elbaíta, esfalerita	ELR-Li – complexo/espodumênio	Xisto Formação São Tomé	Industrial branco a rosado (primário)

A partir do quadro 9.1, pode ser estabelecido que a maioria dos corpos portadores de espodumênio estudados possui como rocha hospedeira os xistos, ou seja, são algo distantes do granito fonte. A maioria dos corpos são classificados como grandes (entre 15 e 50 m) e todos se enquadram no tipo complexo da subclasse ELR-Li, conforme a classificação de Černý & Ercit (2005), com exceção dos pegmatitos da Cachoeira, que pertencem ao tipo albita-espodumênio.

Tendo por base as análises de espodumênios com microsonda eletrônica, percebe-se que suas composições não variam muito da fórmula ideal. As variações mais importantes são notadas para sua principal impureza, o ferro, refletindo inclusive em diferenças significativas nas colorações. Evidenciou-se que os espodumênios verde amarelados têm uma concentração mais alta de ferro, sugerindo, conseqüentemente, relação com a cor, sendo que isto também foi depois confirmado pelas análises de EPR.

Quanto aos feldspatos dos pegmatitos ricos em espodumênio estudados (tabelas 5.3, 6.4, 6.5 e 6.6), algumas considerações devem ser tecidas. Segundo Correia Neves (1981), os valores das relações K/Rb e Rb/Ba nos feldspatos de pegmatitos são principalmente afetados pelos seguintes fatores: composição da fusão pegmatítica, distância do corpo pegmatítico ao granito fonte, tamanho do corpo pegmatítico e condições de pressão de carga e temperatura para as quais a fusão pegmatítica se separou do granitóide. No caso de pegmatitos geneticamente relacionados, os teores de Rb nos feldspatos e os valores das relações Rb/K e Rb/Ba devem aumentar segundo a distância do pegmatito com relação ao granitóide fonte. A Tabela 9.1 mostra tais relações para microclínios das lavras estudadas, além de análises publicadas por Correia Neves (1981), incluindo dois dos corpos estudados (Sapucaia e Urucum).

Tabela 9.1 – Razões K/Rb e Rb/Ba de feldspatos. Pegmatitos: MUr, Urucum; Ca, Cachoeira; e SR, Santa Rosa. Análises por Correia Neves (1981) – Pegmatitos: Sap, Sapucaia; Ur, Urucum; e Mor, Moreira (dados em ppm; todo Fe como Fe₂O₃).

	Rb	Ba	K(%)	K/Rb	Rb/Ba
MUr	907,2	<10	12,74	140,43	90,72
MCa	2429,4	33	12,85	52,89	73,62
MSR	1743,1	<10	13,07	74,98	174,31
Sap1	825	76	10,58	128,2	10,9
Sap2	1016	96	10,49	103,2	10,6
Sap3	1247	99	10,32	82,8	12,6
Ur1	554	247	10,07	181,8	2,24
Ur2	9	64	0,27	300,0	0,14
Mor1	924	151	10,68	115,6	6,12
Mor2	1268	205	11,09	87,5	6,18
Mor3	1662	119	10,38	62,5	13,97
Mor4	3262	132	11,42	35,0	24,71

Pode ser notado a partir da Tabela 9.1 que as razões K/Rb e Rb/Ba são menores para a amostra de feldspato da mina da Cachoeira, o que provavelmente indica uma maior diferenciação dos fluidos formadores de tal depósito. Porém, a partir das análises realizadas, não foi possível observar anomalias que permitissem identificar possíveis relacionamentos dos feldspatos analisados com suas respectivas ocorrências de espodumênio.

Para uma tentativa de compreensão da causa da ampla variedade de aspectos físicos entre os espodumênios da PPOB, com base em pegmatitos estudados e dos dados obtidos, procurou-se estabelecer um esquema onde se reconhece vários estágios de geração do mineral. Na Figura 9.1, apresenta-se uma proposta evolutiva esquemática tendo por base o modelo concebido por Moore (1973) para a cristalização dos pegmatitos graníticos conforme a diminuição da temperatura. Nesse esquema, reconhecem-se os estágios primário, metassomático e hidrotermal, com temperaturas descendentes desde cerca de 700°C até 50°C.

Conforme London & Burt (1982b), a cristalização do espodumênio primário inicia-se por volta de 700 a 650°C. As linhas pontilhadas em 800°C correspondem ao início da cristalização dos pegmatitos; em 200°C, indica-se onde aproximadamente as moléculas de água são estáveis como unidades ligadas aos cátions de metais de transição. Para confirmação de tais dados, pretende-se ainda, em pesquisa futura, realizar estudos de inclusões fluidas nos vários tipos de espodumênio.

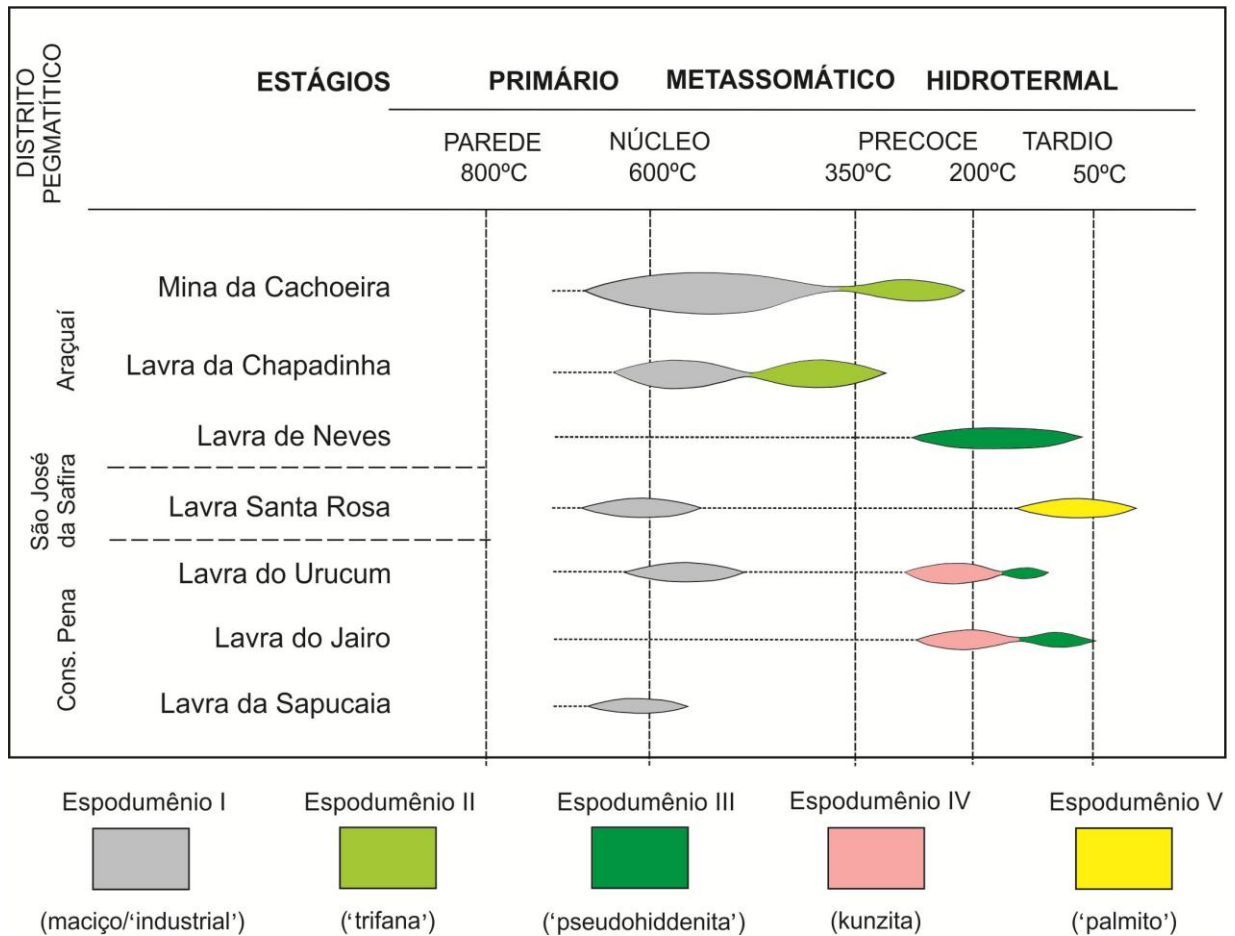


Figura 9.1 – Representação esquemática dos estágios de cristalização do espodumênio em pegmatitos da PPOB.

Na mina da Cachoeira (Araçuaí/Itinga), os vários corpos pegmatíticos geraram uma fase primária de cristalização avantajada. De fato, tal mina constitui o maior depósito de espodumênio conhecido no Brasil. Neste local, reconhecem-se nitidamente dois tipos de espodumênio: um maciço, de coloração cinza a cinza esverdeada (espodumênio I), translúcido a preferencialmente opaco (“industrial”), relacionado à cristalização do núcleo em temperaturas a partir de 700° C, e outro, erroneamente chamado pelos mineradores como “hiddenita”, de coloração verde clara a verde amarelada, translúcido a transparente (espodumênio II, representando o estágio hidrotermal precoce, em temperaturas por volta dos 300° C). Esta última foi designada informalmente no decorrer das pesquisas como “trifana”; sua descrição detalhada encontra-se no capítulo pertinente.

A lavra da Chapadinha (Itinga), situada no mesmo campo pegmatítico do depósito anterior, apresenta uma menor quantidade de espodumênio “industrial” (espodumênio I), lavrado rudimentarmente nas décadas de 1970 a 1990 (Sá, 1977; Cassedanne, 1991). Com a parte

mais rica deste depósito aparentemente esgotada, tem-se permitido apenas a garimpagem de pequenos corpos de substituição ricos em petalita e/ou espodumênio do tipo “trifana” (espodumênio II), muito semelhante ao encontrado na mina da Cachoeira. Segundo Sá (1977), a menor abundância de espodumênio no local deve-se à presença massiva de petalita, após a qual o espodumênio teria sido gerado em condições algo mais baixas de temperatura.

Na lavra de Neves (Araçuaí), aparentemente só se verifica, conforme os trabalhos de campo, a presença do espodumênio verde, de claro a intenso, e transparente (espodumênio III). A ausência de cromo neste mineral no local não permite que ele seja chamado de hiddenita, conforme a concepção de diversos autores (Webster, 1975; Hurlbut & Switzer, 1991; Cornejo & Bartorelli, 2010) de que essa variedade deveria ser restrita a espodumênios cromíferos. De tal maneira, designa-se aqui essa variedade como “pseudohiddenita”. Para Rossovskiy (1981), os espodumênios secundários cristalizam-se na faixa entre 280-120°C. A lavra de Neves constitui a principal produtora dessa variedade de espodumênio no país.

A lavra Santa Rosa, em Itambacuri, é famosa mundialmente pelas elbaítas azuis aí encontradas (Cornejo & Bartorelli, 2010). Atualmente em plena produção, os estudos nessa lavra permitiram que fossem observados dois tipos distintos de espodumênio, nitidamente retratando duas gerações diferentes. O primeiro constitui típicos espodumênios maciços, brancos, do tipo “industrial” (espodumênio I), ocorrendo disseminado na massa pegmatítica da zona intermediária do corpo. O outro tipo é de um espodumênio branco, de hábito fibroso, designado de “palmito” pelos mineradores (espodumênio V). A existência do mesmo processo ocorrendo localmente sobre as turmalinas (turmalinas “em cabelos”) permite estabelecer que a geração de ambos ocorreu a partir de alteração em fase tardia do processo hidrotermal, associado a fraturas, o que é ainda plenamente corroborado pela maior presença de voláteis na amostra analisada de espodumênio.

A lavra do Urucum, em Galiléia, é outra lavra de renome mundial, por causa da produção de quase três toneladas de espodumênio kunzita, das quais cerca de 500 kg de qualidade excepcional. Neste pegmatito, o espodumênio se formou em dois estágios; o primeiro é representado por cristais alongados de até vários metros de comprimento, fortemente corroídos, de cor branca a creme (espodumênio I). O segundo estágio consiste principalmente de kunzita (espodumênio IV), excetuando-se uma pequena quantidade de pseudohiddenita (espodumênio III) associada (Cassedanne, 1986). A ocorrência do mineral em uma grande

cavidade (ou “caldeirão” para os garimpeiros) permite supor que somente uma geração secundária do mineral tenha se cristalizado, com, possivelmente, um estágio tardio que formou a pseudohiddenita.

Situação semelhante à encontrada na lavra anterior ocorre na lavra do Jairo, em Resplendor, no mesmo distrito pegmatítico. Nesta localidade, ocorre o espodumênio kunzita (espodumênio IV), embora em quantidade menor, mas também produz uma quantidade razoável de pseudohiddenita (espodumênio III). Uma “masterpiece” da mineralogia mundial, encontrada nesta lavra (ver Figura 4.13) é um cristal de espodumênio kunzita com terminação em pseudohiddenita. Esta amostra indica nitidamente a existência de duas gerações distintas do mineral, uma precoce e outra tardia, provavelmente nos estágios progressivamente metassomático e hidrotermal.

A lavra da Sapucaia também é famosa mundialmente, neste caso pelo encontro de muitas espécies minerais fosfáticas secundárias, diversas delas descritas a partir de espécimes aí produzidos. A ocorrência de espodumênio neste pegmatito se restringe provavelmente a uma geração primária (espodumênio I), com amostras brancas ou ligeiramente rosadas, encontradas na zona intermediária do corpo.

De tal maneira, são estabelecidos cinco estágios de cristalização do espodumênio, reconhecidos informalmente como estágios “Espodumênio I” até “Espodumênio V” (Figura 9.1), os quais representam condições de cristalização distintas e progressivamente sob menores condições de temperatura (e provavelmente pressões). Tais condições prevaletentes são consideradas responsáveis pela ampla gama de aspectos físicos encontrada entre os espodumênios de pegmatitos da PPOB.

Como um dos objetivos principais deste trabalho, estudou-se também a causa de cores das diferentes variedades desse mineral (Capítulos 7 e 8). Claffy (1953) e Hassan & Labib (1978) (ambos in Charoy et al., 1992), sugeriram, a partir de análise por espectrografia de emissão, que um elevado teor de Mn ou uma elevada razão Mn/Fe são responsáveis pela cor lilás da kunzita. Entretanto, Dias (2002) afirma, através de um estudo comparativo combinando EPR e absorção ótica, que a cor lilás da kunzita não está relacionada ao Mn^{2+} , mas pode ser atribuída ao centro Mn^{4+} . Nas tabelas 5.1 e 5.2, pode-se perceber que o teor de Mn apresenta valores próximos para todas as variedades analisadas. No entanto, as amostras verde

amareladas apresentam maiores conteúdos de Fe, logo as razões Mn/Fe são menores do que para as amostras de cor rosa (kunzitas).

Ainda com relação às causas de cor, as linhas mais largas nos espectros de EPR dos espodumênios verde amarelados podem ser atribuídas ao íon Fe^{3+} em sítios de Al. A intensidade destas linhas aumenta após a irradiação, e observa-se, nos cristais irradiados, uma intensificação da tonalidade amarela. Assim, pode-se pressupor que a componente amarela da cor dos espodumênios seja induzida pelo Fe^{3+} .

Quanto aos Nb-tantalatos, pode-se afirmar que constituem um vasto campo de investigação. Apesar da PPOB ser uma região alvo de centenas de pesquisas geocientíficas, praticamente não existem estudos detalhados acerca de tais minerais nesta província. A identificação de ixiolita associada e intercrescida ou não com tantalita-(Fe), em estudos preliminares conduzidos na mina da Cachoeira, exemplifica esta carência em estudos mineralógicos. Assim, os Nb-tantalatos merecem uma atenção especial em pesquisas futuras.

10 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu melhorar a compreensão acerca do espodumênio e os ambientes nos quais ele é formado. Os pegmatitos portadores deste mineral são, em sua maioria, corpos encaixados em xistos, distantes do granito fonte; a maior parte é classificada como grande (entre 15 e 50 m) e todos apresentam considerável grau de fracionamento, com relação a seus fluidos formadores.

Quanto à ampla variedade de tipos de espodumênios de aspectos diferentes, estabeleceu-se que eles correspondem a estágios de cristalização distintos e, conseqüentemente, diferentes ambientes/condições de formação. Assim, foi possível distinguir cinco tipos diferentes de espodumênio, com relação ao seu estágio de cristalização.

O primeiro provavelmente se formou próximo ao início do resfriamento e cristalização do corpo pegmatítico, a partir de temperaturas por volta de 700°C, sendo considerado primário. Possui hábito maciço, de coloração cinza a cinza esverdeada, translúcido a preferencialmente opaco (denominado genericamente de espodumênio “industrial”). O segundo tipo é diretamente relacionado ao primeiro, apresentando coloração verde clara a verde amarelada, translúcido a transparente, tendo sido designado informalmente como “trifana”, cristalizando-se até por volta de 350°C.

O terceiro tipo se refere ao espodumênio gemológico de coloração verde clara a verde algo intensa (“pseudohiddenita”), tendo sido formado já sob condições hidrotermais, por volta de 200°C ou abaixo disso. O quarto tipo é o espodumênio gemológico rosa, de tonalidade clara até muito intensa, formado também sob condições semelhantes e associadas à anterior, por volta de 200°C. O quinto e último tipo de espodumênio identificado é o apelidado de “palmito”, que é produto de alterações hidrotermais tardias, apresentando hábito fibroso e quebradiço e coloração esbranquiçada.

Com relação às causas de cores dos espodumênios verde amarelados, foi possível estabelecer, através de análises de EPR e absorção ótica, que a componente amarela é causada pelo íon Fe^{3+} . Quanto aos espodumênios verdes, as análises de absorção ótica revelaram sua diferença em relação às hiddenitas “verdadeiras” norte-americanas. A intensidade dos sinais de Fe^{3+} nos espectros de EPR dessas amostras é o dobro da intensidade nas amostras verde

amareladas. Quanto às kunzitas, embora as análises químicas não tenham mostrado anomalias em Mn (a causa de cor em geral associada a esta variedade), elas apresentaram um conteúdo geral de ferro por volta de 15 vezes inferior aos espécimes verdes e verde amarelados.

Este trabalho permitiu, ainda, ampliar o conhecimento acerca dos Nb-tantalatos em pegmatitos portadores de espodumênio, além de possibilitar a identificação de um mineral nunca antes descrito na PPOB, a ixiolita.

Por fim, um dos objetivos deste trabalho foi, ainda, o de tentar estabelecer algum possível padrão geoquímico para os feldspatos entre os diversos pegmatitos portadores de espodumênio estudados. Porém, a partir das análises realizadas, não foi possível observar anomalias que permitissem identificar possíveis relacionamentos dos feldspatos analisados com suas respectivas ocorrências de espodumênio.

No entanto, considera-se que este trabalho tenha alcançado seus objetivos, contribuindo para o conhecimento acerca do espodumênio e seus ambientes de formação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSSON, L.O. The yellow color center and trapped electrons in beryl. **The Canadian Mineralogist**, v. 51, p. 15-25, 2013.
- BLAK, A.R.; ISOTANI, S.; WATANABE, S. Optical absorption and electron spin resonance in blue and Green natural beryl. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 8, p. 161-166, 1982.
- BRAGA, P.F.A. & SAMPAIO, J.A. Lítio. In: LUZ, A.B. & LINS, F.F. (Editores), **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM, p. 585-603, 2008.
- BURNS, R.G. **Mineralogical applications of crystal field theory**. Cambridge: Cambridge University Press, 2nd ed., 551 p., 1993.
- CASSEDANNE, J.P. & CASSEDANNE, J.O. Minerals of the Lavra do Ênio pegmatite. **The Mineralogical Record**, v. 12, n. 2, p. 67-77, 1981.
- CASSEDANNE, J.P. The Urucum pegmatite, Minas Gerais, Brazil. **The Mineralogical Record**, v. 17, n. 5, p. 307-314, 1986.
- CASSEDANNE, J.P. Tipologia das jazidas brasileiras de gemas. In: SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C.S. (Editores) **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, v. 4A, p. 17-52, 1991.
- CASSEDANNE, J.P. & BAPTISTA, A. The Sapucaia pegmatite, Minas Gerais, Brazil. **The Mineralogical Record**, v. 30, n. 5, p. 347-366, 1999.
- ČERNÝ, P. (Editor). **Granitic pegmatites in science and industry**. Toronto: Mineralogical Association of Canada, 555 p. (Short course handbook, v. 8), 1982.
- ČERNÝ, P. Rare-element granitic pegmatites. Part II: regional to global environments and petrogenesis. **Geoscience Canada**, v. 18, n. 2, p. 68-81, 1991.
- ČERNÝ, P. & ERCIT, T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. **Canadian Mineralogist**, v. 43, n. 6, p. 2005-2026, 2005.
- CHAROY, B.; LHOTE, F.; DUSAUSOY, Y. The crystal chemistry of spodumene in some granitic aplite-pegmatite of Northern Portugal. **Canadian Mineralogist**, v. 30, n. 3, p. 639-651, 1992.
- CHAVES, M. & SCHOLZ, R. Pegmatito Gentil (Mendes Pimentel, MG) e suas paragêneses mineralógicas de fosfatos raros. **Revista da Escola de Minas**, v. 61, n. 2, p. 141-149, 2008.
- COHEN, A.J. & JANEZIC, G.G. Relationships among trapped hole and trapped electron centers in oxidized soda-silica glasses of high purity. **Physica Status Solidi (a)**, v. 77, p. 619-624, 1983.
- CORNEJO, C. & BARTORELLI, A. **Minerais e Pedras Preciosas do Brasil**. São Paulo: Solaris, 701 p., 2010.

CORREIA NEVES, J.M. **Pegmatitos Graníticos: morfologia, mineralogia, geoquímica, gênese e metalogênese**. Belo Horizonte, 1981. 500 p. Tese de concurso para professor titular, Universidade Federal de Minas Gerais.

CORREIA NEVES, J.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; MARCIANO, V.R. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, n. 1, p. 106-118, 1986.

DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. Depósitos minerais no tempo geológico e épocas metalogenéticas. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Editores), **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. Brasília: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, p. 365-447, 2003.

DELANEY, P.J.V. **Gemstones of Brazil: Geology and Occurrences**. Ouro Preto: Editora REM – Revista da Escola de Minas, 125 p., 1996.

DIAS, G.O.; OTTONI, J.E.; PINHEIRO, M.V.B.; KRAMBROCK, K.; KARFUNKEL, J.; LAMEIRAS, F.S.; ADDAD, J.; PERSIANO, A.I.C. Centros de cor de kunzita brasileira e espodumênio amarelo, naturais e irradiados, investigados por EPR e absorção ótica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GEMAS, 1, Ouro Preto, 2000.

DIAS, G.O. **Espodumênio brasileiro natural e tratado: um estudo dos centros de cor e coloração artificial**. Belo Horizonte, 2002. 70 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais.

DRYSDALE, D.J. Petalite and spodumene in the Meldon Aplite, Devon. **Mineralogical Magazine**, v. 49, p. 758-759, 1985.

FILIP, J.; NOVÁK, M.; BERAN, A.; ZBOŘIL, R. Crystal chemistry and OH defect concentrations in spodumene from different granitic pegmatites. **Physics and chemistry of minerals**, v. 32, p. 733-746, 2006.

FUJII, A.T. & ISOTANI, S. Optical absorption study of five varieties of spodumene. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 60, n. 2, p. 127-135, 1988.

GOLDSTEIN, J.I.; NEWBURY, D.E.; JOY, D.C.; LYMAN, C.E.; ECHLIN, P.; LIFSHIN, E.; SAWYER, L.; MICHAEL, J.R. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. New York: Springer US, 3rd ed., 690 p., 2003.

GOMES, C.B. Microsonda eletrônica: princípios e aplicações na geologia. In: GOMES, C.B. (Coordenador), **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 159-208, 1984.

HASKIN, L.A.; WILDEMAN, T.R.; HASKIN, M.A. An accurate procedure for the determination of the rare earths by neutron activation. **Journal of Radioanalytical Chemistry**, v. 1, p. 337-348, 1968.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M. DA C.; SILVA, L.C. DA; TROUW, R.A.J. Província Mantiqueira. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNERIO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. DE. (Organizadores), **Geologia do**

continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flavio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p. 203-234, 2004.

HOLY, F. EPR of Mn^{++} in spodumene natural crystals. **Canadian Journal of Physics**, v. 46, p. 287-302, 1968.

HURLBUT Jr., C.S. & SWITZER, G.S. **Gemology**. New York: John Wiley & Sons, 336 p., 2 ed., 1991.

IBGM – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS & METAIS PRECIOSOS. **Manual Técnico de Gemas**. Brasília: Instituto Brasileiro de Gemas & Metais Preciosos, Departamento Nacional de Produção Mineral, 220 p., 2009.

ISOTANI, S; FURTADO, W.W.; ANTONINI, R; DIAS, O.L. Line-shape and thermal kinetics analysis of the Fe^{2+} band in Brazilian green beryl. **American Mineralogist**, v. 74, p. 432-438, 1989.

ISOTANI, S; FUJII, A.T.; ANTONINI, R.; PONTUSCHKA, W.M.; RABBANI, S.R; FURTADO, W.W. Luminescence study of spodumene. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 62, n. 2, 1990.

ISOTANI, S; FUJII, A.T.; ANTONINI, R.; PONTUSCHKA, W.M.; RABBANI, S.R; FURTADO, W.W. Optical absorption study of radiation and thermal effects in brazilian samples of spodumene. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, n. 63, n. 2, 1991.

ISOTANI, S; BLAK, A.R.; WATANABE, S. UV optical absorption spectra analysis of beryl crystals from Brazil. **Physica B**, v. 405, p. 1501-1508, 2010.

ITO, A. S. & ISOTANI, S. Heating effects on the optical absorption spectra of irradiated, natural spodumene. **Radiation Effects and Defects in Solids**, v. 116, n. 4, p. 307-314, 1991.

KLEIN, C. & DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais**. Traduzido por: Rualdo Menegat. Porto Alegre: Bookman, 23^a ed., 716 pp., 2012.

LANDES, K.K. Origin and classification of pegmatites (concluded): classification of pegmatites. **American Mineralogist**, v. 18, n. 3, p. 95-103, 1933.

LONDON, D. Experimental phase equilibria in the system $LiAlSiO_4-SiO_2-H_2O$: a petrogenetic grid for lithium-rich pegmatites. **American Mineralogist**, v. 69, p. 995- 1004, 1984.

LONDON, D. Internal differentiation of rare-element pegmatites; a synthesis of recent research. **Geological Society of America**, Special Paper 246, 1990.

LONDON, D. **Pegmatites**. [Québec]: Mineralogical Association of Canada, 347 p. (The Canadian Mineralogist, Special Publication 10), 2008.

LONDON, D.; BURT, D.M. Lithium aluminosilicate occurrences in pegmatites and the lithium aluminosilicate phase diagram. **American Mineralogist**, v. 67, n. 5, p. 483-493, 1982(a).

LONDON, D. & BURT, D.M. Chemical models for lithium aluminosilicate stabilities in pegmatites and granites. **American Mineralogist**, v. 67, n. 5, p. 494-509, 1982(b).

LONDON, D. & KONTAK, D.J. Granitic pegmatites: scientific wonders and economic bonanzas. **Elements**, v. 8, n. 4, p. 257-261, 2012.

MAUTHNER, M. The history of kunzite and the California connection. **Rocks & Minerals**, v. 86, n. 2, p. 112-131, 2011.

MOORE, P.B. Pegmatite phosphates: descriptive mineralogy and crystal chemistry. **Mineralogical Record**, v. 4, n. 3, p. 103-130, 1973.

MORAIS FILHO, J.C. **Carta geológica Novo Cruzeiro, fl. SE-24-V-C-I. Projeto Leste, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1996.

NALINI Jr, H.A.; BILAL, E.; CORREIA NEVES, J.M. Syn-collisional peraluminous magmatism in the Rio Doce region: mineralogy, geochemistry and isotopic data of the neoproterozoic Urucum suite (eastern Minas Gerais state, Brazil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 120-125, 2000.

NASSAU, K. The origins of color in gems and minerals, part 2. **Gems & Gemology**, v. 15, p. 2-11, 1975.

OLIVEIRA, M.J.R. **Carta geológica Conselheiro Pena, fl. SE-24-Y-C-II. Projeto Leste, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2000.

OLIVEIRA, R.A.P. **Estudo da luminescência do cristal de espodumênio**. São Cristóvão, 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe.

PAES, V.J.C.; HEINECK, C.A.; MALOUF, R.F; LEITE, C.A.S. **Carta geológica Itaobim, fl. SE-24-V-A-IV. Programa Geologia do Brasil, Escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2008.

PAIVA, G. Províncias pegmatíticas do Brasil. **Boletim DNPM/DFPM**, v. 78, p. 13-21, 1946.

PEDROSA-SOARES, A.C.; NOCE, C.M.; ALKMIN, F.F. DE; SILVA, L.C. DA; BABINSKY, M.; CORDANI, U.; CASTAÑEDA, C. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2007.

PEDROSA-SOARES, A.C.; CHAVES, M.L.S.C.; SCHOLZ, R. Field Trip Guide. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITIC PEGMATITES, 4, 2009, Recife. **Contributions...** [Belo Horizonte]: PEG2009, 28 p., 2009.

PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS, C.; NOCE, C.M.; SILVA, L.C.; NOVO, T.; RONCATO, J.; MEDEIROS, S.; CASTAÑEDA, C.; QUEIROGA, G.; DANTAS, E.; DUSSIN, I.; ALKMIN, F.F. Late Neoproterozoic–Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. **Geological Society, Special Publications**, v. 350, p. 25-51, 2011.

PISTILLI, M. **Lithium deposit types: brine, pegmatite and sedimentary**. Disponível em: <http://lithiuminvestingnews.com/6529/lithium-deposits-brine-pegmatite-sedimentary/>. Acessado em: 27jun2014.

PORPHÍRIO, N.A.; BARBOSA, M.I.M.; BERTOLINO, L.C. Caracterização mineralógica de minérios: Parte I. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. (Editores), **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, p. 57-84, 2010.

ROMEIRO, J.C.P. **Controle da mineralização de lítio em pegmatitos da Mina da Cachoeira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG**. Belo Horizonte, 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

ROSSOVSKIY, L.N. Rare-metal pegmatites with precious stones and conditions of their formation (Hindu Kush). *International Geology Review*, v. 23, n. 11, p. 1312-1320, 1981.

SÁ, J.H. da SILVA. **Pegmatitos litiníferos da região de Itinga-Araçuaí, Minas Gerais**. São Paulo, 1977. 111 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

SCHOLZ, R. **Mineralogia fosfática do Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena, Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2006. 120 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

SCHOLZ, R.; KARFUNKEL, J.; BERMANEC, V.; COSTA, G.M.; HORN, A.H.; CRUZ SOUZA, L.A.; BILAL, E. Amblygonite-montebrazite from Divino das Laranjeiras Mendes Pimentel pegmatitic swarm, Minas Gerais, Brasil. II. Mineralogy. **Romanian Journal of Mineral Deposits**, v. 83, p. 135-139, 2008.

SIGNORELLI, N. **Carta geológica Itambacuri, fl. SE-24-Y-A-I. Projeto Leste, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1996.

SILVEIRA, L.A.G. **O espodumênio e suas variedades**. Disponível em: <http://www.joiabr.com.br/gem/0105.html>. Acessado em: 23out2012.

SIMMONS, W.B. & WEBBER, K.L. Pegmatite genesis: state of the art. **European Journal of Mineralogy**, v. 20, n. 4, p. 421-438, 2008.

SINKANKAS, J. **Gemstones of North America**. New York: Van Nostrand Reinhold, vol. 1, 675 p., 1959.

SPAETH, J.-M.; NIKLAS, J.R.; BARTRAM, R.H. Structural analysis of point defect in solids. **Springer Series of Solid State Sciences**, v. 43, 1992.

STASIULEVICIUS, R. & FRANCO, R.R. Alguns resultados obtidos em amostras de espodumênio – $\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$ expostas às radiações. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA PARA O PROGRESSO DA CIÊNCIA, 21, 1969. Anais, p. 213-214, 1969.

STASIULEVICIUS, R.; CHAVES, M.L.S.C.C.; KASTNER, G.F. **Variedades de espodumênio expostas às radiações do reator TRIGA Mark I – IPR-R1**. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2000 (CDTN-885/2000).

THOMAS, R.J.; BÜHMANN, D.; BULLEN, W.D.; SCOGINGS, A.J.; DE BRUIN, D. Unusual spodumene pegmatites from the Late Kibaran of southern Natal, South Africa. **Ore Geology Reviews**, v. 9, p. 161-182, 1994.

TORNOS, F. Asociaciones minerales en procesos de alteración y relleno hidrotermal sobre rocas silicicoalumínicas. In: MELGAREJO, J.C. (Editor), **Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada**. Barcelona: Edicions de la Universitat de Barcelona, p. 249-271, 1997.

VIDAL, F. W. H. & NOGUEIRA NETO, J. A. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A. DA C.; SOUSA, J.F. DE; MATTOS, I.C. (Organizadores), **Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará**. Fortaleza: CETEM, p. 67-81, 2005.

VIEIRA, V.S. **Carta geológica Itabirinha de Mantena, fl. SE-24-Y-A-V. Projeto Leste, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Escala 1:100.000**. Belo Horizonte: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1996.

WEBSTER, R. **Gems: Their Sources, Descriptions and Identification**. London: Newnes-Butterworths, 3rd ed., 931 p., 1975.

ANEXO I – Paper submetido à Revista da Escola de Minas**Uncommon Nb-tantalate from the Cachoeira mine, Araçuaí pegmatite district (Minas Gerais)**

Nb-tantalato incomum da Mina da Cachoeira, distrito pegmatítico de Araçuaí (Minas Gerais)

Coralie Heinis Dias – Doctorate's student – IGC/UFMG – Belo Horizonte

Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves – Associated Professor – IGC/UFMG – Belo Horizonte

Abstract

Important spodumene-rich pegmatites have been mined by CBL (Companhia Brasileira de Lítio, Brazilian Lithium Co.) at the Cachoeira mine (northeastern Minas Gerais state) since the 1990's. In this deposit, black platy crystals resembling columbite-tantalite are also found; they were analyzed by electronic microprobe as part of the first author's master's degree dissertation. The Cachoeira pegmatite group comprises several spodumene-rich bodies that consist of peritic microcline, spodumene (on average 23vol%), albite, quartz and muscovite, totalizing more than 95% of the bodies' volume. Analyses on 27 samples of supposedly Nb-tantalates showed a high variation of Ta, Nb and Sn contents, which has been observed inclusive in individual crystals, causing color variation on backscattered electrons images. Surprisingly, analyses on some grains also revealed the presence of ixiolite, a mineral species that has never been described in that region; it is characterized by high SnO₂ contents (up to ~16wt%). Tantalite-(Fe) phase represents 32% of total Nb-tantalates analyzed samples, columbite-(Fe) 29%, tantalite-(Mn) 3% and ixiolite, 36%. Cassiterite, also observed, shows significant Ta₂O₅ contents, probably indicating general exsolution processes.

Keywords: Nb-tantalates, ixiolite, Cachoeira mine, spodumene, Araçuaí pegmatite district.

Resumo

Desde os anos 1990, a CBL (Companhia Brasileira de Lítio) tem explorado importantes pegmatitos ricos em espodumênio, na Mina da Cachoeira (nordeste do estado de Minas Gerais). Neste depósito, cristais tabulares pretos semelhantes a columbita-tantalita também são encontrados; eles foram analisados por microsonda eletrônica como parte da dissertação de mestrado da primeira autora. O grupo pegmatítico da Cachoeira é constituído por diversos corpos ricos em espodumênio, que consistem de microclínio, espodumênio (em média 23% em volume), albite e quartzo, totalizando mais de 95% do volume dos corpos. Análises sobre 27 amostras de supostos Nb-tantalatos mostraram uma forte variação nos teores de Ta, Nb e Sn, a qual foi notada inclusive em um mesmo grão, refletindo em diferenças de coloração nas imagens obtidas por elétrons retroespalhados. Surpreendentemente, análises sobre alguns grãos revelaram ainda a presença de ixiolita, mineral nunca antes descrito nesta região; ele se caracteriza pelo alto conteúdo de SnO₂ (até ~16wt%). A fase tantalita-(Fe) representa 32% do total de amostras de Nb-tantalatos analisadas, a fase columbita-(Fe) 29%, tantalita-(Mn) 3%, e ixiolita 36%. As cassiteritas, também observadas, revelaram teores significantes de Ta₂O₅, o que provavelmente indica a ocorrência de processos gerais de exsolução.

Palavras chave: Nb-tantalatos, ixiolita, Mina da Cachoeira, espodumênio, distrito pegmatítico de Araçuaí.

1. Introduction

Since the 1990's CBL (Companhia Brasileira de Lítio, Brazilian Lithium Co.) has mined important spodumene-rich pegmatites at the Cachoeira mine, on the border between Araçuaí and Itinga counties (northeastern Minas Gerais state), around 18 km (by road) to the east of Araçuaí town (Figure 1). UTM coordinates from the office area are 189720/8142540 (305 m). Such pegmatite bodies are inserted in the Araçuaí district of the Eastern Brazilian Pegmatite Province (EBP), defined by Paiva (1946). The mining seeks mainly “industrial” spodumene ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) in order to obtain lithium salts. In this deposit, black minerals resembling columbite-tantalite are found, and 27 samples were analyzed by electronic microprobe as part of the first author’s master’s degree dissertation.

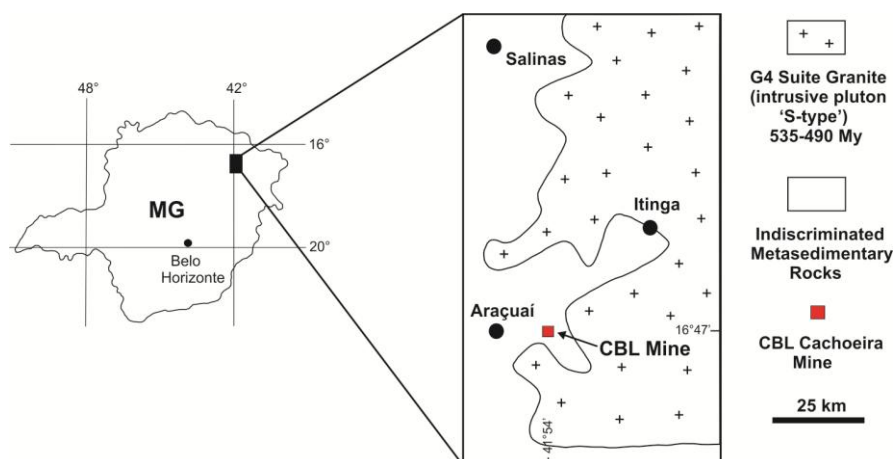


Figure 1 – CBL Cachoeira mine localization eastern of Araçuaí town (modified from Romeiro and Pedrosa-Soares, 2005).

Minerals from the columbite-tantalite series are the most common Nb-tantalates found in granitic pegmatites, mainly occurring as solid solutions. Their generic formula is AB_2O_6 , where the A site is normally occupied by Fe or Mn, and the B site is generally filled by Nb, Ta, Sn and Ti cations (Černý et al., 1998; Martins et al., 2011). They are orthorhombic, crystallizing with Pbcn structure, and their true cell has: $a \sim 14.4 \text{ \AA}$, $b \sim 5.8 \text{ \AA}$ and $c \sim 5.1 \text{ \AA}$ (Grice et al., 1976). In such series, it is reported that the Mn:Fe ratio increases according to the fractionation within a body or pegmatite group. Likewise, it is expected that the Ta:Nb ratio growth follows the chemical fractionation degree (Martins et al., 2011). According to Burke (2008), end-members of this series are currently designated as tantalite-(Fe), tantalite-(Mn), columbite-(Fe) and columbite-(Mn).

Ixiolite represents a columbite substructure, with the cations in disordered arrangement; its generic formula can be written as $(\text{A,B,C})_4\text{O}_8$, where all metals occupy the same site, $\text{A}=\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$; $\text{B}=\text{Nb}, \text{Ta}$; $\text{C}=\text{Sn}, \text{Ti}$ (Palache et al., 1944; Nickel et al., 1963; Grice et al., 1976). According to Wise et al. (1998), orthorhombic ixiolite structure reverts, after heating, to an ordered (monoclinic) wodginite cell. There is a controversy about ixiolite structure and crystallography. Most of authors described ixiolite as orthorhombic (e.g. Nickel et al., 1963; Grice et al., 1976; Černý et al., 1998); some mineralogical websites, however, state that the structure is monoclinic (e.g. Handbook of Mineralogy, 2015; Web Mineral, 2015). In relation to crystallography, Grice et al. (1976) have refined the structure, obtaining: $a=4.785(2)$, $b=5.758(2)$ and $c=5.160(2)$.

2. Geological setting

Most pegmatites of the Araçuaí district are the results of the crystallization of residual melts from post-collisional G4-type granites, which intruded between 535 Ma and 490 Ma (Pedrosa-Soares et al., 2011). Main host rocks are biotite schists with variable contents of andaluzite, cordierite and sillimanite of the Salinas Formation. The low pressure metamorphic silicates (andaluzite and cordierite), the presence of petalite in some pegmatites and the quantitative geothermobarometric data suggest a relatively shallow crustal level (5 to 10 km) for these pegmatites. The intrusions occurred along the regional foliation and short fracture systems, generally dipping to SE or NW in the Salinas schists (Correia-Neves et al., 1986).

Main geological descriptions of the CBL mine are based on Romeiro (1998) and Romeiro and Pedrosa-Soares (2005). The Cachoeira pegmatite group is constituted by a swarm of spodumene-rich pegmatites (Figure 2A), which are roughly tabular bodies with lens-shaped terminations. They range in thickness from decimeters up to 30 m and in length from a few meters to more than 300 m along the strike. The bodies and their segments form an array of en echelon pattern, and consist of peritic microcline, spodumene (on average 23vol%), albite, quartz and muscovite, totalizing more than 95% of the body volume. Montebrazite, beryl, cassiterite, cookeite and lithiophosphate are other rare accessory minerals.

According to the same authors, CBL pegmatites intruded along two different NE-striking surfaces of medium- to high-angle dip: the NW-dipping schistosity and the SE-dipping fracture cleavage. These pegmatites always show sharp contacts with the host rock (Figure 2B) and a discontinuous, thin, fine-grained chilled margin (that could be interpreted as a marginal zone of granitic texture). No internal zoning can be seen, although variations of crystal size occur in specific sites, such as tops and low-angle dip segments of the pegmatites. Despite of the pegmatites thickness, they are homogeneous bodies with spodumene, as well as the other disseminated essential minerals, as Nb-tantalates (Figure 2C). Such important factor favors the current mining process.

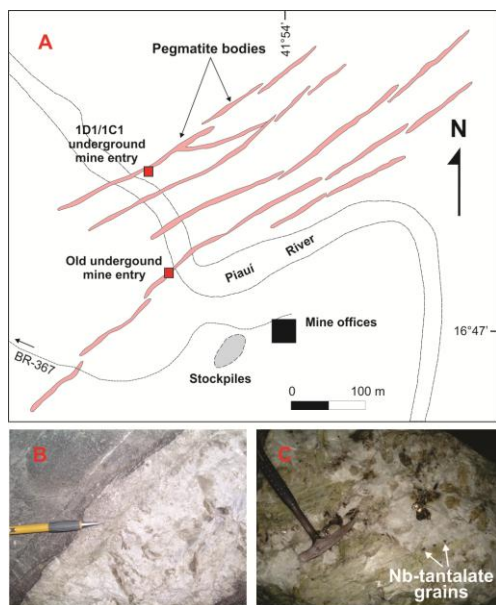


Figure 2 – A. Cachoeira pegmatite group map showing pegmatite bodies (including projections from subsurface) of the CBL mine area, modified from Romeiro (1998). B. Sharp contact between the pegmatite and the host rock. C. Detail of millimetric size Nb-tantalate grains (dark) in a feldspar-spodumene-(quartz) matrix (light).

Sá (1977) presented an age of 467 ± 18 Ma for the Cachoeira pegmatites, which were dated by the K-Ar method in muscovite. According to Černý and Ercit (2005) classification scheme, such bodies can be inserted in the rare-element class, Li subclass, albite-spodumene type.

3. Chemical mineralogy – Results

The 27 sampled crystals vary in size from millimeters to around 2.5 cm; they are generally platy and striated parallel to (110), the same plane as the cleavage. Samples were set up in polished sections, and the analyses were carried out at the microanalysis lab (LAMIN) at the Physics Department – Federal University of Minas Gerais, with JEOL-JXA8900R electron microprobe. An accelerating potential of 15 kV, a specimen current of 20 nA and a beam diameter about 20 μm were used, with the following standards: metal – Ta_2O_5 , rodonite – MnO , cassiterite – SnO_2 , magnetite – FeO , UO_2 – UO_2 , rutile – TiO_2 , metal – Nb_2O_5 , and metal – WO_3 . Images of backscattered electrons were also locally taken in order to evidence possible compositional variations.

According to Table 1, a great variation of Ta, Nb and Sn contents in Nb-tantalates from the Cachoeira mine can be observed. For analyzed columbite-tantalites, Ta_2O_5 contents range between 18.57 and 57.00wt%; Nb_2O_5 between 23.22 and 58.73wt%; and Sn between 0.60 and 4.02wt%. According to Betejtin (1977), SnO_2 contents in tantalites can reach 2wt%, and rarely up to 9wt%. Some samples turned out to be ixiolites, with Ta_2O_5 contents ranging between 52.62 and 61.28wt%; Nb_2O_5 between 9.46 and 17.52wt%; and Sn between 11.24 and 15.83wt%.

Fe and Mn contents vary in a shorter range: for columbite-tantalites, between 8.54 and 14.88wt%, and 4.64 and 9.42wt%, respectively; for ixiolites, between 7.60 and 9.23wt%, and 4.29 and 6.24wt%, respectively. Due to short Fe-Mn variation, relative contents of Nb, Ta and Sn of the samples were emphasized in an oxide Ta-Nb-Sn ternary diagram (constructed with Minpet software). The three analyzed cassiterite samples are Ta-rich and Nb-poor. According to Dunn et al. (1978), about 11wt% Ta_2O_5 might be a maximum for solid solution of tantalum in cassiterite.

The existence of these two populations with distinct chemical aspects is well illustrated in Figure 3A. The first one shows columbite-tantalite compositional variation, and probably represents fractionation within the pegmatite; as Martins et al. (2011) point out that the Ta:Nb ratio growth follows the chemical fractionation degree. The other population shows samples with the highest amounts of Ta, and the smallest of Fe, evidencing the presence of a phase with higher Sn contents. Samples compositions were also positioned within the columbite quadrilateral diagram (Fig. 3B), in which Tantalite-(Fe) phase represents 32% of total Nb-tantalates analyzed samples, columbite-(Fe) 29%, tantalite-(Mn) 3% and ixiolite, 36%.

Table 1 – Electronic microprobe analyses of Nb-tantalates and cassiterite from the CBL Cachoeira mine (wt. %; averages of 4 or 5 spots; total iron as FeO; analyses “a” and “b” show distinct compositions within the same grain).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Species
Am1	30.55	48.13	11.76	7.54	0.65	1.09	0.28	100.01	columbite-(Fe)
Am2	39.14	40.29	10.35	8.16	0.66	0.62	0.06	99.27	tantalite-(Fe)
Am3	22.19	54.56	13.82	5.91	0.85	1.81	0.08	99.23	columbite-(Fe)
Am4	42.20	37.30	10.26	8.51	0.71	0.54	0.04	99.57	tantalite-(Fe)
Am5	20.11	57.36	14.16	6.32	0.75	1.71	0.13	100.53	columbite-(Fe)
Am6	22.21	54.75	14.07	6.01	1.25	2.00	0.08	100.37	columbite-(Fe)
Am7	52.62	17.52	8.85	5.12	13.51	1.30	0.07	98.99	ixiolite
Am8	49.46	31.24	8.54	9.42	0.62	0.36	0.10	99.72	tantalite-(Mn)
Am9a	47.57	30.39	10.75	6.72	1.69	2.03	0.29	99.44	tantalite-(Fe)
Am9b	53.36	16.85	8.88	5.48	13.59	1.28	0.06	99.50	ixiolite
Am10	30.94	47.79	11.92	7.68	0.66	0.93	0.17	100.08	columbite-(Fe)
Am11	21.06	55.25	13.81	6.03	0.85	1.60	0.21	98.81	columbite-(Fe)
Am12	61.28	9.46	7.60	6.16	14.66	1.04	0.07	100.02	ixiolite
Am13	58.17	11.25	7.83	5.98	15.83	0.56	0.03	99.49	ixiolite
Am14	31.98	46.78	13.08	6.52	0.69	1.20	0.02	100.19	columbite-(Fe)
Am15	41.40	37.03	11.39	7.00	0.73	1.27	0.05	98.85	tantalite-(Fe)
Am16a	50.64	27.97	11.97	4.92	1.55	2.21	0.07	99.19	tantalite-(Fe)
Am16b	52.00	24.23	11.31	4.65	4.08	1.99	0.05	98.01	tantalite-(Fe)
Am17a	38.19	40.36	12.24	6.13	0.88	1.45	0.06	99.50	columbite-(Fe)
Am17b	58.60	11.07	8.25	4.92	13.69	3.15	0.04	99.70	ixiolite
Am18a	57.00	23.22	10.69	6.19	0.87	1.22	0.00	98.96	tantalite-(Fe)
Am18b	57.67	11.40	8.80	4.96	14.66	2.07	0.02	99.61	ixiolite
Am19	50.96	27.23	12.00	5.42	1.25	1.84	0.05	98.58	tantalite-(Fe)
Am20a	18.57	58.73	14.88	6.97	0.77	1.46	0.13	101.24	columbite-(Fe)
Am20b	49.46	29.13	11.84	5.27	1.34	1.69	0.07	98.78	tantalite-(Fe)
Am21a	56.98	23.75	10.93	6.09	0.60	1.17	0.08	99.47	tantalite-(Fe)
Am21b	57.19	11.75	9.05	4.29	15.08	2.85	0.06	100.10	ixiolite
Am22a	52.87	14.43	9.14	4.59	15.35	1.30	0.02	97.76	ixiolite
Am22b	57.23	11.24	9.23	4.44	13.96	3.40	0.04	99.31	ixiolite
Am23	59.43	12.21	7.90	6.24	11.40	1.43	0.09	98.60	ixiolite
Am24	57.58	14.02	8.45	6.02	11.24	1.32	0.09	98.75	ixiolite
Am25	6.70	0.70	1.45	0.02	91.78	0.60	0.03	101.28	cassiterite
Am26	6.56	0.72	1.43	0.05	92.27	0.61	0.02	101.67	cassiterite
Am27	5.75	0.62	1.13	0.08	93.68	0.57	0.03	101.86	cassiterite

The recognition of ixiolite phase was confirmed through X-ray diffraction analyses (DEMIN lab, Engineering School, Federal University of Minas Gerais). The pattern obtained from the analysis of powder constituted by samples Am21 to Am24 (from Table 1) is shown in Figure 4. However, information about unit cell parameters or a Mössbauer spectroscopy study are important for more precise results, and further analyses are being conducted in order to bring certainty to our results.

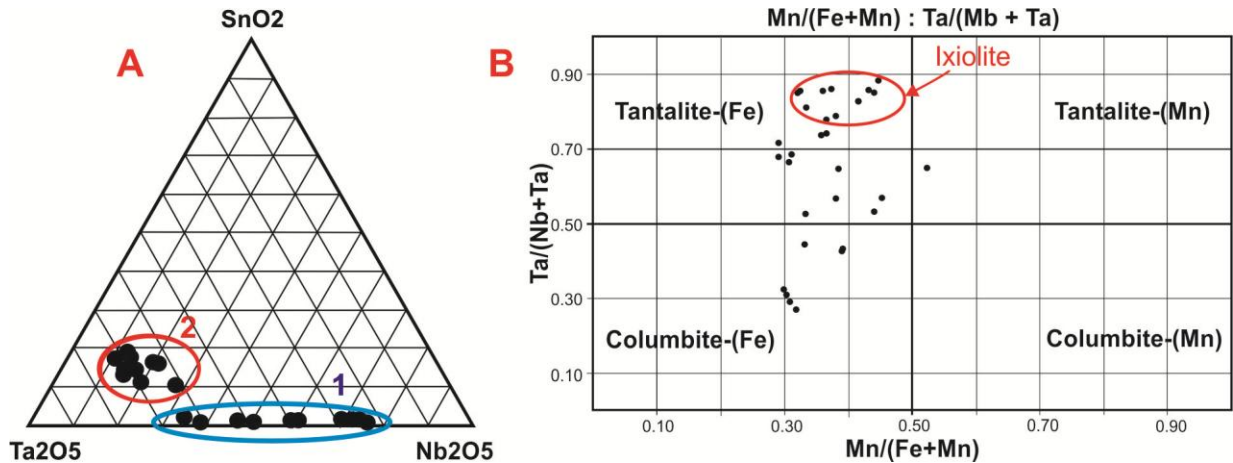


Figure 3 – A. Ternary diagram showing relative contents of Ta_2O_5 , Nb_2O_5 and SnO_2 . Group 1 represents columbite-tantalite compositions, while group 2 shows a Sn-rich phase, revealed as ixiolite. B. Columbite quadrilateral plot, showing the classification of the samples within the solid solution.

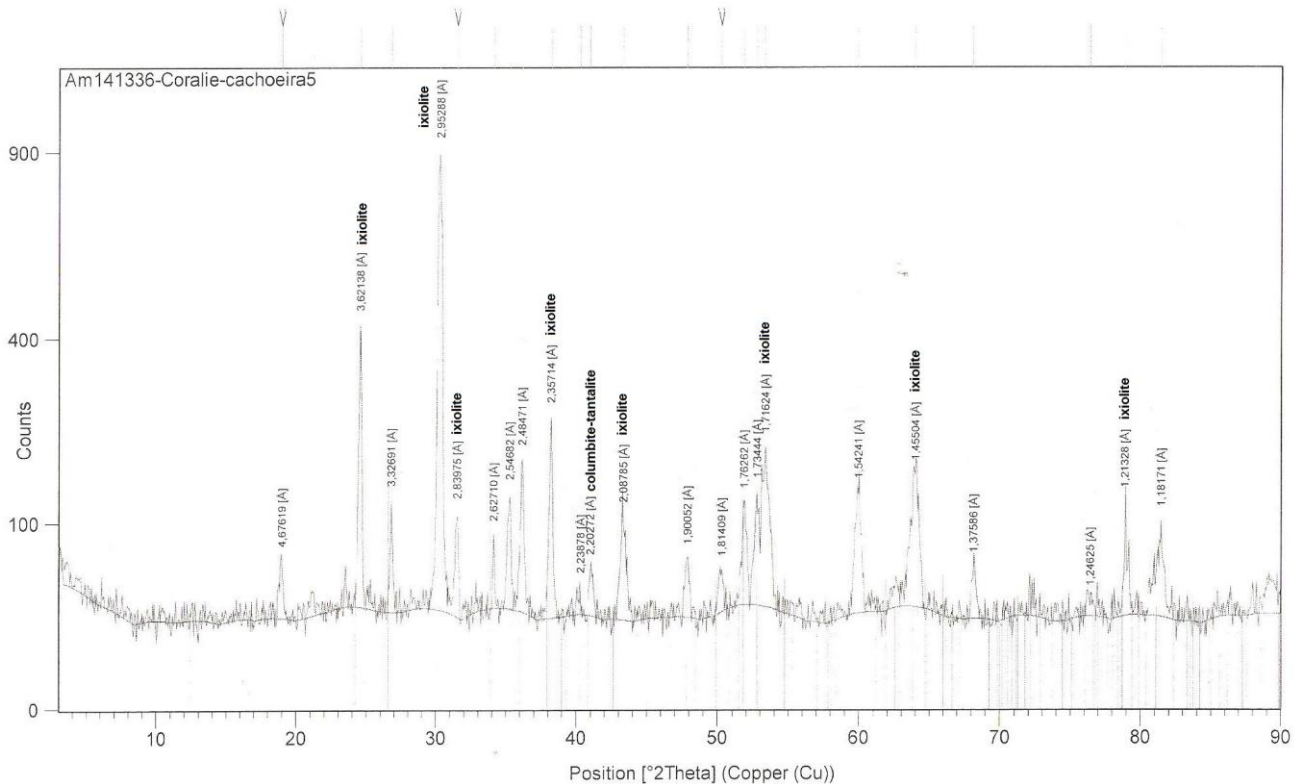


Figure 4 – X-ray diffraction pattern for samples Am21 to Am24.

Such variation can even be observed in a single grain, reflecting in coloring variation on images obtained by electronic microprobe (Figure 5A, B and C). On the backscattered electrons image, the greater the phase's average atomic number, the lighter it shows on image. As Ta atomic number is greater (73) than that of Nb (41), phases with higher Ta proportions over Nb have a lighter color on images. Analyses of phases with different colorations (grains from Figure 5) are shown on Tables 2, 3 and 4, where lighter parts show higher Ta_2O_5 contents.

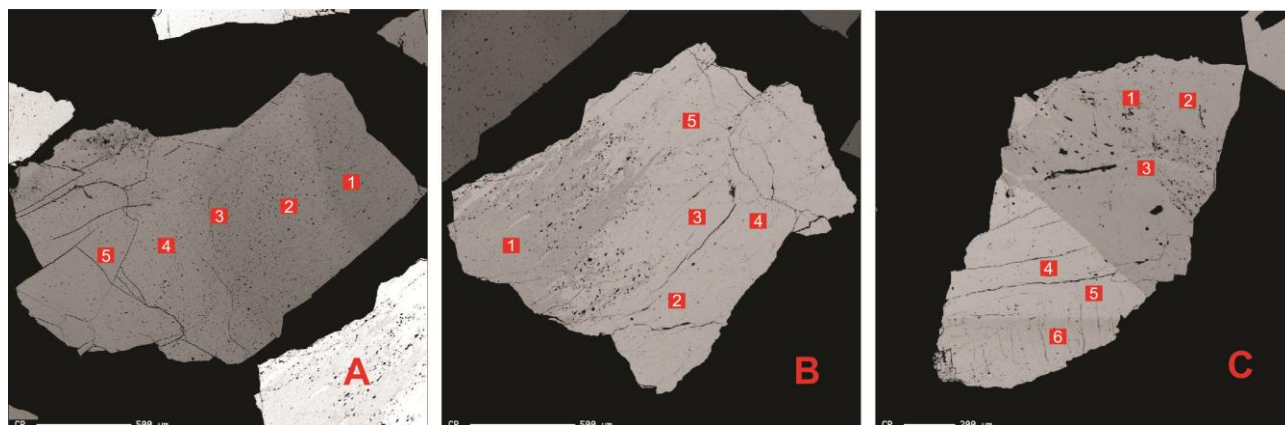


Figure 5 – Backscattered electrons images of Nb-tantalates. A. Sample Am3. B. Sample Am7. C. Sample Am9. All show color (and chemical) intensity differences.

Table 2 – Electronic microprobe analyses (wt%) of different color intensities in columbite-(Fe) sample Am3 (total iron as FeO).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Species
Am3/1- Darker part	20.57	55.42	13.72	6.22	0.89	1.75	0.23	98.81	columbite-(Fe)
	21.46	55.25	13.95	5.97	0.72	1.81	0.02	99.17	columbite-(Fe)
	22.25	54.25	14.34	5.81	0.92	1.85	0.10	99.51	columbite-(Fe)
	22.56	54.68	13.32	5.69	0.85	1.71	0.06	98.87	columbite-(Fe)
Am3/5 - Lighter part	24.12	53.18	13.76	5.87	0.88	1.95	0.00	99.77	columbite-(Fe)

Analyses of sample Am3 (Figure 5A) exhibited quite similar values, although the lighter part shows a slightly higher Ta content. A color gradation can be observed (lighter to darker, from left to right) and compositional variation is confirmed in analyses from Table 2. Image of sample Am7 (Figure 5B) shows an intergrowth of ixiolite (lighter part) and tantalite-(Fe) (darker part), according to Table 3.

A compositional difference can also be noticed through the color variation on Figure 5C. Table 4 shows analyses of sample Am9 (analysis of point 1 was ignored for been considered erroneous). Points 4, 5 and 6 presented high Sn contents, exactly where Ta₂O₅ value is higher; iron content reduces together with Nb₂O₅.

Table 3 – Electronic microprobe analyses (wt%) of different phases related to color intensities in Nb-tantalate sample Am7 (total iron as FeO; lighter part analysis as an average of 4 points).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Species
Am7 - Darker part	48.38	29.81	10.73	6.60	1.61	1.89	0.71	99.73	tantalite-(Fe)
Am7 - Lighter part	52.62	17.52	8.85	5.12	13.51	1.30	0.07	98.99	ixiolite

Table 4 – Electronic microprobe analyses (wt%) of different color intensities in Nb-tantalate sample Am9 (total iron as FeO).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	Total	Species
Am9 - 2	47.34	30.41	10.95	6.34	2.13	1.94	0.42	99.53	tantalite-(Fe)
Am9 - 3	47.81	30.37	10.54	7.11	1.25	2.11	0.17	99.36	tantalite-(Fe)
Am9 - 4	53.02	16.59	8.84	5.41	14.21	1.27	0.07	99.41	ixiolite
Am9 - 5	53.48	16.66	9.02	5.64	13.64	1.25	0.07	99.75	ixiolite
Am9 - 6	53.59	17.31	8.77	5.40	12.91	1.32	0.03	99.33	ixiolite

4. Comparative discussions

For comparison, analyses were carried out in Nb-tantalates from three other rare-element class (REL), lithium subclass (according to Černý and Ercit (2005) classification) deposits in the EBP: Neves, Ipê and Cruzeiro pegmatites (Table 5). The first one is rich on vivid green gemologic spodumene, but spodumene is not reported in the other two. Neves and Cruzeiro pegmatites can be classified as “complex-type” (as well as the Cachoeira pegmatite), while the Ipê is considered a “beryl-type”; thus, it is less evolved than spodumene-bearing pegmatites, and Nb-tantalates from it show lower Ta:Nb ratios. In analyzed samples from these deposits, Ta₂O₅ and Nb₂O₅ contents are highly variable, while SnO₂ values are inexpressive, showing that relatively high contents of this oxide is a typical characteristic of Nb-tantalates from the Cachoeira mine.

Table 5 – Electronic microprobe analyses of Nb-tantalates from the Neves (Nev), Ipê and Cruzeiro (Cru) pegmatites from EBP. Data of Cruzeiro pegmatite according to César Mendes (1995) (wt. %; total iron as FeO; na = not analyzed).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	UO ₂	CaO	Na ₂ O	MgO	Total	Species
Nev1	62.09	19.29	3.03	13.51	0.39	0.61	0.05	na	na	na	98.82	tantalite-(Mn)
Nev2	16.73	61.77	16.33	3.30	0.75	1.12	0.07	na	na	na	100.18	columbite-(Fe)
Ipê1	17.97	59.02	16.68	4.77	0.24	1.60	0.03	na	na	na	100.89	columbite-(Fe)
Ipê2	18.11	58.84	16.44	4.68	0.24	1.56	0.04	na	na	na	100.49	columbite-(Fe)
Cru1	53.51	30.01	0.06	15.41	0.05	0.03	0.07	0.08	0.08	0.03	99.33	tantalite-(Mn)
Cru2	52.90	30.31	0.17	13.96	0.14	0.22	0.10	0.84	0.60	0.42	99.66	tantalite-(Mn)
Cru3	55.04	29.28	0.02	14.28	0.22	0.31	0.04	0.03	0.01	0.02	99.25	tantalite-(Mn)

On the other hand, Table 6 shows analyses of Nb-tantalates from important Li-rich granitic pegmatites in original and large worldwide known deposits for additional comparisons. Thus, data from the famous Tanco pegmatite, Southeastern Manitoba, Canada (Grice et al., 1972) and from the Syväjärvi pegmatite, Kaustinen District, Western Finland (Al-Ani et al., 2008) are presented. It is observed that in the “classic” Skögböle and Bradlo deposits, SnO₂ contents vary around 11-12wt%.

In the Tanco pegmatite, Nb-tantalates occur as disseminations in the silicate minerals, and most of columbite-tantalites correspond to tantalite-(Mn), with MnO contents around 14wt% and FeO contents <0.5wt%. During the crystallization of the pegmatite, Nb-tantalates concentrated in late inner zones; Ta:Nb ratio increases in consecutively later zones, while Mn:Fe ratio decreases (Grice et al., 1972). These authors state that the physical properties of tantalite and “pseudo-ixiolite” (as it was erroneously designated by them; according to Grice et al., 1976) are very similar and these minerals can only be distinguished by X-ray diffraction.

In the Syväjärvi pegmatite, columbite-tantalite compositions are characterized by high Ta:Nb ratios; the Mn and Fe cations have relatively similar concentrations, with Mn:Fe very close to 1. There is a single occurrence of ixiolite within one grain of tantalite with a high concentration of SnO₂ (8.25wt%), related to an alteration product of tantalite-(Fe) in grain Syv1, with a composition close to the wodginite group (Al-Ani et al., 2008).

Table 6 – Electronic microprobe analyses of ixiolite from initial discoveries from Skögbole (Skö), Kimito Island, Finland (Palache et al., 1944), and Bradlo (Bra), Czech Republic (Nickel et al., 1963). Other analyses from Tanco pegmatite (Tan), Canada (Grice et al., 1972), and Syvjärvi pegmatite (Syv), Finland (Al-Ani et al., 2008) (wt. %; total iron as FeO; na = not analyzed).

	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	FeO	MnO	SnO ₂	TiO ₂	WO ₃	ZrO ₂	Total	Species
Skö	61.47	10.50	8.08	5.40	12.27	0.38	0.30	0.60	99.00	ixiolite
Bra	63.79	6.12	2.98	9.19	11.38	2.68	1.87	0.20	98.21	ixiolite
Tan1	69.30	16.00	0.40	13.70	0.50	1.50	na	na	101.40	tantalite-(Mn)
Tan2	70.00	17.50	0.40	14.50	0.20	0.20	na	na	102.80	tantalite-(Mn)
Tan3	83.50	4.00	3.30	11.30	0.00	0.20	na	na	102.30	tantalite-(Mn)
Tan4	67.00	16.00	0.50	13.50	0.70	0.30	na	na	98.00	tantalite-(Mn)
Tan5	64.20	21.00	0.20	14.60	0.10	0.40	na	na	100.50	tantalite-(Mn)
Tan6	62.00	18.50	0.40	15.00	0.20	1.20	na	na	97.30	ixiolite
Tan7	64.00	18.00	0.50	15.10	1.80	1.70	na	na	101.10	ixiolite
Tan8	64.00	22.00	0.10	14.40	0.60	0.80	na	na	101.90	ixiolite
Tan9	52.50	27.00	4.00	12.10	1.20	6.20	na	na	103.00	ixiolite
Tan10	64.70	21.50	0.10	14.60	0.60	0.80	na	na	102.30	ixiolite
Tan11	66.20	20.50	0.10	14.40	0.90	0.60	na	na	102.70	ixiolite
Syv1a	63.36	18.42	7.69	8.45	0.14	0.54	na	na	98.59	tantalite-(Mn)
Syv1b	61.73	7.13	6.24	6.08	8.25	0.06	na	na	89.48	ixiolite
Syv2	63.66	15.89	7.56	7.89	0.95	0.42	na	na	96.37	tantalite-(Mn)
Syv3	64.33	17.90	7.46	8.56	0.15	0.63	na	na	99.02	tantalite-(Mn)
Syv4	36.57	45.27	9.98	8.07	0.15	0.61	na	na	100.64	columbite-(Fe)
Syv5	28.51	50.61	9.98	8.98	0.07	0.66	na	na	98.80	columbite-(Fe)
Syv6	61.58	19.98	8.33	7.69	0.21	0.89	na	na	98.68	tantalite -(Fe)

It can be observed from Table 6 that all ixiolites present high amounts of Ta₂O₅, as in samples from the studied CBL Cachoeira mine. Tanco ixiolites have very low SnO₂ contents, while Syvjärvi's SnO₂ contents are more close to Cachoeira ones, but still lower.

5. Concluding remarks

Although the EBP is a target region of hundreds of geoscientific studies, several mineralogical issues persist. In this regard, Nb-tantalates constitute an extensive investigation field; there are almost no detailed studies concerning such minerals. Preliminary studies conducted on the Cachoeira mine, which led to the identification of ixiolite associated and intergrown or not with tantalite-(Fe), exemplify that lack of knowledge. It has been the first ixiolite description in the region; this mineral presents chemical aspects much closer to those described in the literature (Palache et al., 1944; Nickel et al., 1963) than those related for the Tanco pegmatite, and is characterized by high tin contents (up to 16wt% SnO₂). Cassiterite presence at the same deposit, with significant contents of Ta₂O₅ (~5wt%), probably indicates, at least partially, the occurrence of exsolution processes.

6. Acknowledgements

The authors thank engineer M. Kataoka (CBL) for receptivity and kindness providing samples from Cachoeira mine, and engineer L. Menezes Filho (in memorian), for relevant information and providing samples from Ipê mine. We also thank Prof. Dr. P. Brandão (EE/UFGM) for XRD analyses. The first author thanks the IGC/UFGM, where she finalizes her Master's Thesis. M. Chaves also thanks CNPq for granting the research productivity scholarship.

7. References

- AL-ANI, T., PAKKANEN, L., AHTOLA, T. Nb-Ta oxide minerals from complex granitic spodumene pegmatites in the Kaustinen district, Western Finland. **Geological Survey of Finland Report serial**, M19, 41 p., 2008.
- BETEJTIN, A. **Curso de Mineralogia**. Moscou: Editorial Mir, 739 p., 1977.
- BURKE, E.A.J. Tidying up mineral names: an IMA-CNMNC scheme for suffixes, hyphens and diacritical marks. **Mineralogical Record**, v. 39, p. 131-135, 2008.
- ČERNÝ, P., ERCIT, T.S., WISE, M.A., CHAPMAN, R., BUCK, H.M. Compositional, structural and phase relationships in titanian ixiolite and titanian columbite-tantalite. **Canadian Mineralogist**, v. 36, p. 547-561, 1998.
- ČERNÝ, P. & ERCIT, T.S. The classification of granitic pegmatites revisited. **Canadian Mineralogist**, v. 43, p. 2005-2026, 2005.
- CÉSAR MENDES, J. **Mineralogia e gênese dos pegmatitos turmaliníferos da Mina do Cruzeiro, São Jose da Safira, Minas Gerais**. São Paulo, 1995, 260 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CORREIA-NEVES, J.M., PEDROSA-SOARES, A.C., MARCIANO, V.R.P.R.O. A Província Pegmatítica Oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 106-118, 1986.
- DUNN, P.J., GAINES, R. W., WOLFE, C.W., BARBOSA, C.doP. Epitaxial wodginite and cassiterite from Lavra Jabuti, Baixio, Galilea, Minas Gerais, Brasil. **Mineralogical Record**, v. 9, p. 14-18, 1978.
- FERGUSON, R.B., HAWTHORNE, F.C., GRICE, J.D. The crystal structures of tantalite, ixiolite and wodginite from Bernic Lake, Manitoba. II. Wodginite. **Canadian Mineralogist**, v. 14, p. 550-560, 1976.
- GRICE, J.D., ČERNÝ, P., FERGUSON, R.B. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. II. wodginite, tantalite, pseudo-ixiolite and related minerals. **Canadian Mineralogist**, v. 11, p. 609-642, 1972.
- GRICE, J.D., FERGUSON, R.B., HAWTHORNE, F.C. The crystal structures of tantalite, ixiolite and wodginite from Bernic Lake, Manitoba. I. Tantalite and ixiolite. **Canadian Mineralogist**, v. 14, p. 540-549, 1976.
- HANDBOOK OF MINERALOGY. Site: <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/ixiolite.pdf>. Acesso em 15/04/2015.
- MARTINS, T., LIMA, A., SIMMONS, W.B., FALSTER, A.U., NORONHA, F. Geochemical fractionation of Nb-Ta oxides in Li-bearing pegmatites from the Barroso-Alvão pegmatite field, Portugal. **Canadian Mineralogist**, v. 49, p. 777-791, 2011.
- NICKEL, E.H., ROWLAND, J.F., McADAM, R. Ixiolite – a columbite substructure. **American Mineralogist**, v. 48, p. 961-979, 1963.
- PAIVA, G. Províncias pegmatíticas do Brasil. **Boletim DNPM/DFPM**, v. 78, p. 13-21, 1946.
- PALACHE, C., BERMAN, H., FRONDEL, C. **Dana's system of mineralogy (7th Edition)**. New York: John Wiley, v. 1, 778 p., 1944.
- PEDROSA-SOARES, A.C. et alli. Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogeny (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. **Geological Society of London (Special Publication)**, v. 350, p. 25-51, 2011.
- ROMEIRO, J.C.P. **Controle da mineralização de lítio em pegmatitos da Mina da Cachoeira, Companhia Brasileira de Lítio, Araçuaí, MG**. Belo Horizonte, 1998. 94 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- ROMEIRO, J.C.P. & PEDROSA-SOARES, A.C. Controle do minério de espodumênio em pegmatitos da mina da Cachoeira, Araçuaí, MG. **Geonomos**, v. 13, p. 75-81, 2005.

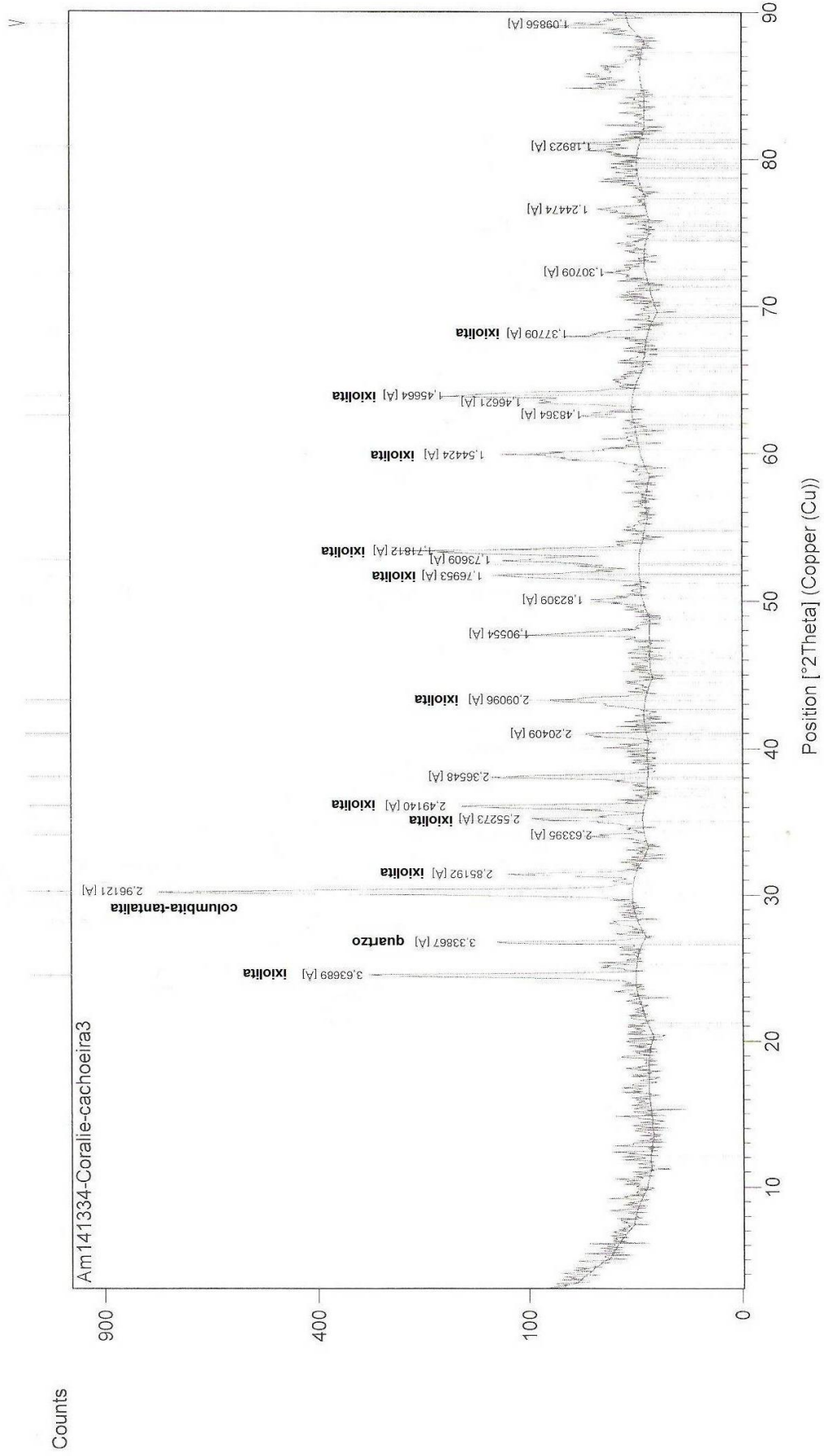
SÁ, J.H.S. **Pegmatitos litiníferos da região de Itinga-Araçuaí, Minas Gerais**. São Paulo, 1977. 111 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

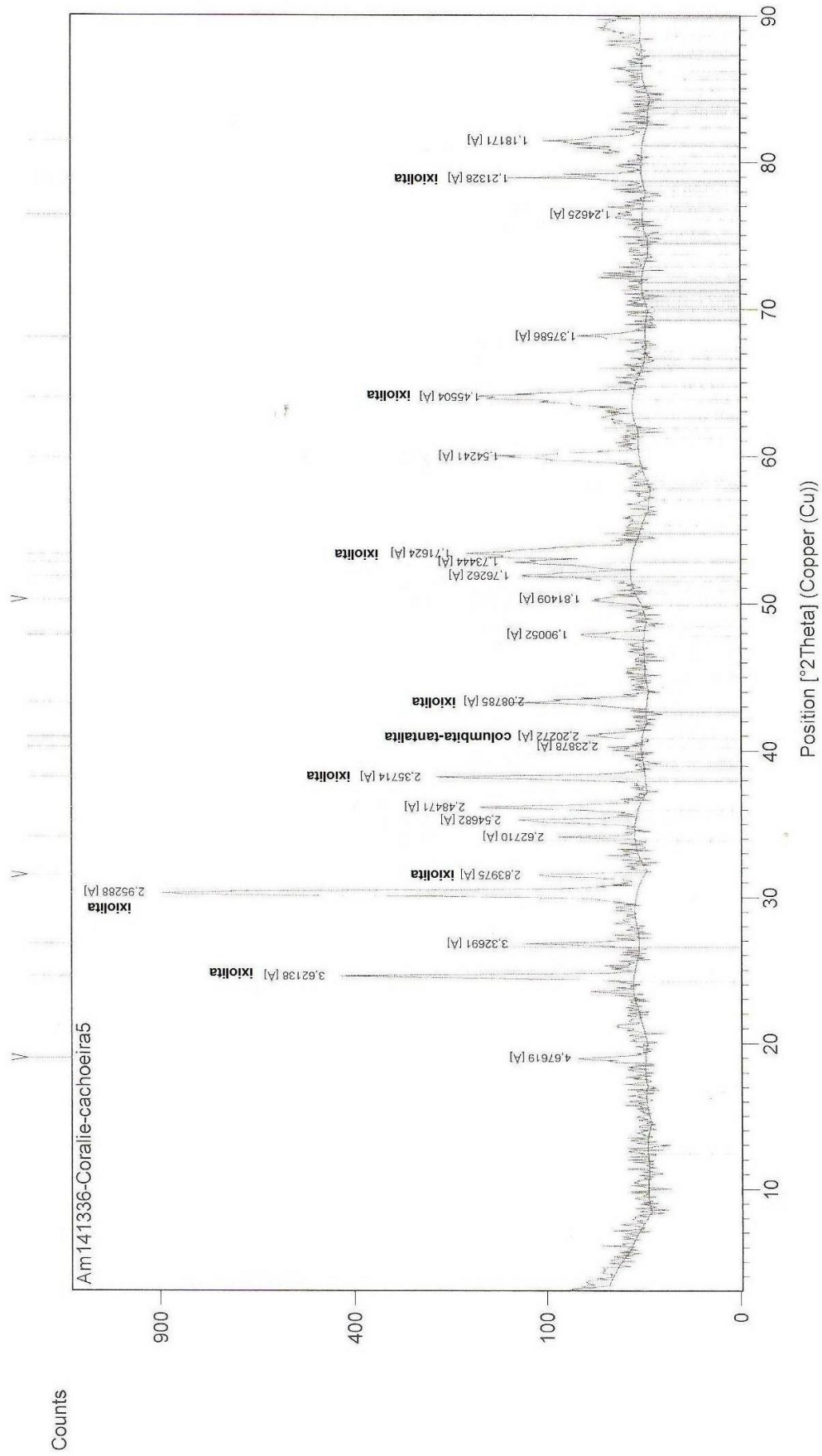
WEB MINERAL. Site: <http://webmineral.com/data/Ixiolite.shtml#.VUD6QiFVikp>. Acesso em 15/04/2015.

WISE, M.A., ČERNÝ, P., FALSTER, A.U. Scandium substitution in columbite-group minerals and ixiolite. **Canadian Mineralogist**, v. 36, p. 673-680, 1998.

ANEXO II – Resultados completos das análises por difração de raios-X

Os Nb-tantalatos da mina da Cachoeira, analisados por microsonda eletrônica, foram também submetidos a análises por difração de raios-X (DEMIN/UFMG), para confirmação da presença da fase ixiolita. São apresentados a seguir os difratogramas obtidos de tais análises.





ANEXO III – Resultados completos das análises por microsonda eletrônica

As análises com microsonda eletrônica foram realizadas em quatro dias. Os espodumênios e feldspatos foram analisados em 25/11/2013 e 03/06/2014. Os Nb-tantalatos foram analisados em 27/11/2013 e 13/03/2014. Os resultados completos são apresentados nas tabelas III.1, III.2, III.3 e III.4.

Tabela III.1 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em feldspatos e espodumênios (25/11/2013). Amostras: A, espodumênio Urucum; D, espodumênio Neves; E, espodumênio Sapucaia; F, espodumênio Resplendor; 1, espodumênio Cachoeira (“industrial” verde escuro); 3, albita Urucum; 4, espodumênio Cachoeira (gemológico verde amarelado); 5, albita Neves; 6, albita Cachoeira.

Group: Geologia_Mario													
Sample: MC251113-Esp													
Weight percent													
No.	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	SiO ₂	FeO	Cl	Al ₂ O ₃	K ₂ O	F	CaO	MgO	Total	Comment
3	0,11	0,19	0,00	64,70	0,00	0,01	27,25	0,00	0,00	0,00	0,00	92,26	Am. A - 1
4	0,12	0,19	0,01	63,44	0,00	0,01	27,22	0,02	0,03	0,02	0,00	91,03	Am. A - 2
5	0,13	0,09	0,01	63,50	0,07	0,01	27,16	0,02	0,21	0,02	0,00	91,11	Am. A - 3
6	0,12	0,13	0,00	63,36	0,00	0,01	27,01	0,01	0,17	0,01	0,03	90,77	Am. A - 4
7	0,13	0,14	0,00	63,01	0,00	0,01	27,28	0,00	0,09	0,01	0,00	90,65	Am. A - 5
8	0,09	0,06	0,00	64,87	0,00	0,01	27,47	0,01	0,14	0,00	0,00	92,60	Am. A - 6
9	0,13	0,07	0,03	64,33	0,04	0,01	27,24	0,02	0,00	0,00	0,00	91,86	Am. A - 7
10	0,11	0,04	0,00	64,17	0,09	0,01	27,59	0,01	0,00	0,01	0,00	92,03	Am. A - 8
11	0,10	0,08	0,00	63,47	0,02	0,00	27,41	0,02	0,06	0,02	0,00	91,13	Am. A - 9
12	0,15	0,04	0,01	64,10	0,06	0,02	27,51	0,01	0,05	0,00	0,00	91,93	Am. A - 10
13	0,15	0,06	0,01	62,84	0,02	0,00	27,30	0,01	0,00	0,01	0,02	90,41	Am. A - 11
14	0,14	0,06	0,00	61,71	0,00	0,00	27,42	0,02	0,00	0,00	0,01	89,36	Am. A - 12
15	0,12	0,11	0,00	62,80	0,00	0,01	27,44	0,02	0,06	0,02	0,01	90,57	Am. A - 13
16	0,15	0,06	0,06	61,63	0,03	0,00	27,39	0,03	0,00	0,00	0,00	89,36	Am. A - 14
17	0,13	0,09	0,04	60,83	0,00	0,01	27,09	0,00	0,12	0,01	0,01	88,26	Am. A - 15
18	0,14	0,09	0,00	59,76	0,03	0,00	27,47	0,03	0,00	0,02	0,01	87,53	Am. A - 16
19	0,11	0,10	0,02	60,51	0,00	0,00	27,28	0,02	0,02	0,01	0,00	88,07	Am. A - 17
20	0,15	0,04	0,01	60,11	0,02	0,00	27,58	0,02	0,10	0,01	0,01	88,01	Am. A - 18
21	0,13	0,05	0,04	60,83	0,02	0,01	27,57	0,01	0,00	0,01	0,00	88,66	Am. A - 19
22	0,14	0,05	0,02	60,51	0,05	0,02	27,62	0,01	0,00	0,00	0,00	88,40	Am. A - 20
23	0,11	0,10	0,01	63,61	0,00	0,01	27,61	0,02	0,00	0,00	0,00	91,45	Am. A - 21
24	0,11	0,06	0,02	62,83	0,00	0,03	27,46	0,02	0,00	0,01	0,01	90,53	Am. A - 22
25	0,07	0,00	0,00	63,36	0,00	0,01	27,38	0,00	0,05	0,01	0,00	90,86	Am. A - 23
26	0,15	0,05	0,00	64,04	0,07	0,03	27,50	0,02	0,00	0,00	0,02	91,86	Am. A - 24
27	0,13	0,05	0,00	63,61	0,02	0,01	27,17	0,01	0,00	0,00	0,00	90,99	Am. A - 25
28	0,11	0,10	0,03	63,36	0,00	0,01	27,46	0,00	0,09	0,01	0,00	91,14	Am. A - 26
29	0,12	0,08	0,00	63,66	0,00	0,01	27,60	0,02	0,00	0,02	0,00	91,51	Am. A - 27
30	0,09	0,02	0,01	64,00	0,00	0,01	27,59	0,02	0,31	0,00	0,00	91,93	Am. A - 28
31	0,15	0,01	0,03	63,99	0,00	0,00	27,54	0,03	0,04	0,00	0,00	91,77	Am. A - 29
32	0,12	0,04	0,00	63,80	0,00	0,00	27,44	0,00	0,00	0,01	0,02	91,43	Am. A - 30
93	0,10	0,00	0,04	65,74	0,35	0,01	27,42	0,00	0,00	0,00	0,03	93,69	Am. D - 1
94	0,09	0,06	0,01	65,71	0,29	0,00	26,88	0,00	0,08	0,01	0,04	93,12	Am. D - 2
95	0,11	0,07	0,01	65,68	0,19	0,00	27,27	0,00	0,01	0,00	0,02	93,35	Am. D - 3
96	0,09	0,03	0,04	65,64	0,20	0,00	27,23	0,02	0,02	0,00	0,03	93,30	Am. D - 4
97	0,09	0,11	0,06	65,95	0,30	0,00	27,12	0,01	0,00	0,00	0,03	93,66	Am. D - 5
98	0,10	0,01	0,02	65,86	0,26	0,02	27,04	0,00	0,16	0,01	0,01	93,42	Am. D - 6
99	0,09	0,09	0,03	66,26	0,25	0,01	27,09	0,01	0,00	0,00	0,02	93,84	Am. D - 7
100	0,09	0,03	0,01	66,38	0,24	0,01	27,55	0,01	0,00	0,00	0,00	94,32	Am. D - 8
101	0,13	0,03	0,02	65,46	0,24	0,01	27,12	0,00	0,09	0,02	0,00	93,09	Am. D - 9
102	0,09	0,00	0,00	65,59	0,24	0,01	27,12	0,01	0,00	0,00	0,02	93,07	Am. D - 10

103	0,12	0,09	0,02	65,60	0,16	0,00	27,45	0,02	0,35	0,02	0,01	93,70	Am. D - 11
104	0,09	0,06	0,00	66,14	0,28	0,02	27,34	0,01	0,00	0,00	0,03	93,96	Am. D - 12
105	0,14	0,02	0,03	66,48	0,22	0,01	27,51	0,01	0,02	0,00	0,03	94,45	Am. D - 13
106	0,11	0,04	0,02	65,96	0,34	0,00	27,18	0,01	0,00	0,00	0,04	93,69	Am. D - 14
107	0,07	0,10	0,03	65,83	0,23	0,01	27,30	0,03	0,00	0,00	0,01	93,60	Am. D - 15
108	0,12	0,06	0,05	66,12	0,23	0,01	27,41	0,00	0,12	0,00	0,03	94,10	Am. D - 16
109	0,12	0,08	0,00	65,91	0,22	0,00	27,25	0,01	0,09	0,00	0,00	93,63	Am. D - 17
110	0,12	0,10	0,07	66,34	0,23	0,01	27,27	0,02	0,01	0,02	0,03	94,22	Am. D - 18
111	0,09	0,04	0,01	66,06	0,19	0,00	27,04	0,02	0,16	0,00	0,01	93,54	Am. D - 19
112	0,10	0,01	0,03	65,87	0,28	0,01	26,96	0,02	0,00	0,01	0,02	93,31	Am. D - 20
113	0,09	0,01	0,05	65,78	0,25	0,01	27,32	0,00	0,00	0,00	0,01	93,50	Am. D - 21
114	0,10	0,02	0,04	66,22	0,20	0,01	26,90	0,02	0,00	0,01	0,01	93,52	Am. D - 22
115	0,09	0,03	0,04	66,37	0,19	0,02	27,52	0,00	0,00	0,02	0,02	94,29	Am. D - 23
116	0,12	0,06	0,00	66,09	0,26	0,01	27,23	0,01	0,00	0,02	0,02	93,80	Am. D - 24
117	0,11	0,09	0,03	66,85	0,31	0,00	27,30	0,00	0,23	0,00	0,01	94,84	Am. D - 25
118	0,10	0,00	0,00	66,22	0,18	0,00	27,07	0,01	0,00	0,00	0,00	93,59	Am. D - 26
119	0,11	0,00	0,00	66,68	0,21	0,00	26,99	0,00	0,00	0,00	0,00	93,98	Am. D - 27
120	0,10	0,09	0,01	66,29	0,24	0,00	27,19	0,01	0,00	0,00	0,02	93,94	Am. D - 28
121	0,08	0,03	0,04	66,21	0,16	0,01	26,67	0,01	0,06	0,02	0,02	93,28	Am. D - 29
122	0,12	0,04	0,03	66,12	0,27	0,01	27,30	0,00	0,00	0,00	0,02	93,92	Am. D - 30
123	0,15	0,03	0,00	64,33	0,00	0,00	27,58	0,01	0,00	0,01	0,00	92,10	Am. E - 1
124	0,14	0,04	0,00	65,03	0,05	0,00	27,25	0,01	0,00	0,00	0,02	92,55	Am. E - 2
125	0,12	0,11	0,01	65,64	0,07	0,00	27,72	0,01	0,00	0,00	0,00	93,68	Am. E - 3
126	0,12	0,10	0,00	64,51	0,02	0,00	27,39	0,00	0,24	0,00	0,00	92,28	Am. E - 4
127	0,15	0,09	0,00	64,75	0,04	0,00	27,53	0,02	0,00	0,00	0,00	92,58	Am. E - 5
128	0,16	0,12	0,06	64,12	0,09	0,00	27,43	0,03	0,01	0,01	0,01	92,03	Am. E - 6
129	0,10	0,05	0,01	64,12	0,09	0,00	27,39	0,01	0,24	0,00	0,01	91,91	Am. E - 7
130	0,14	0,12	0,01	62,66	0,07	0,00	27,61	0,03	0,00	0,01	0,00	90,65	Am. E - 8
131	0,12	0,08	0,00	62,84	0,02	0,01	27,36	0,01	0,00	0,00	0,00	90,45	Am. E - 9
132	0,13	0,10	0,00	63,63	0,10	0,01	27,73	0,00	0,11	0,00	0,00	91,76	Am. E - 10
133	0,13	0,07	0,00	64,96	0,05	0,01	27,54	0,00	0,00	0,01	0,00	92,78	Am. E - 11
134	0,15	0,07	0,01	63,33	0,03	0,01	27,58	0,02	0,10	0,05	0,03	91,33	Am. E - 12
135	0,12	0,10	0,01	63,90	0,03	0,00	27,67	0,03	0,12	0,00	0,00	91,93	Am. E - 13
136	0,11	0,06	0,01	65,05	0,06	0,00	27,68	0,01	0,27	0,00	0,01	93,14	Am. E - 14
137	0,18	0,03	0,00	65,09	0,04	0,02	27,45	0,00	0,13	0,02	0,00	92,90	Am. E - 15
138	0,13	0,00	0,00	64,55	0,08	0,01	27,71	0,02	0,25	0,00	0,01	92,64	Am. E - 16
139	0,11	0,04	0,00	64,89	0,02	0,01	27,52	0,00	0,00	0,00	0,04	92,63	Am. E - 17
140	0,09	0,02	0,02	64,90	0,08	0,02	27,35	0,03	0,17	0,01	0,00	92,61	Am. E - 18
141	0,12	0,05	0,04	63,58	0,12	0,01	27,42	0,01	0,00	0,01	0,02	91,38	Am. E - 19
142	0,12	0,05	0,00	63,57	0,03	0,00	27,38	0,00	0,00	0,02	0,01	91,16	Am. E - 20
143	0,11	0,11	0,00	64,03	0,01	0,00	27,46	0,01	0,04	0,00	0,00	91,75	Am. E - 21
144	0,13	0,03	0,00	63,47	0,00	0,00	27,51	0,00	0,25	0,00	0,00	91,29	Am. E - 22
145	0,12	0,02	0,03	63,52	0,04	0,00	27,48	0,01	0,12	0,00	0,02	91,30	Am. E - 23
146	0,12	0,07	0,05	64,97	0,07	0,00	27,44	0,01	0,00	0,00	0,00	92,73	Am. E - 24
147	0,12	0,03	0,00	64,12	0,05	0,00	27,58	0,02	0,07	0,01	0,03	91,99	Am. E - 25
148	0,15	0,03	0,04	64,47	0,04	0,01	27,50	0,01	0,00	0,00	0,00	92,23	Am. E - 26
149	0,16	0,02	0,00	63,72	0,03	0,01	27,49	0,01	0,00	0,01	0,00	91,45	Am. E - 27
150	0,11	0,00	0,00	64,32	0,00	0,00	27,48	0,01	0,12	0,00	0,00	91,99	Am. E - 28
151	0,13	0,05	0,02	63,35	0,00	0,00	27,46	0,03	0,02	0,00	0,01	91,06	Am. E - 29
152	0,13	0,01	0,04	64,36	0,05	0,01	27,34	0,02	0,00	0,00	0,00	91,95	Am. E - 30
153	0,12	0,03	0,00	63,89	0,00	0,02	27,58	0,01	0,00	0,01	0,03	91,68	Am. F - 1
154	0,13	0,03	0,01	64,48	0,00	0,02	27,37	0,04	0,00	0,00	0,01	92,08	Am. F - 2
155	0,10	0,04	0,00	63,39	0,05	0,01	27,64	0,03	0,17	0,00	0,00	91,35	Am. F - 3
156	0,10	0,04	0,00	62,92	0,00	0,01	27,20	0,00	0,00	0,00	0,02	90,28	Am. F - 4
157	0,09	0,01	0,04	62,26	0,00	0,01	27,54	0,01	0,00	0,00	0,02	89,98	Am. F - 5
158	0,06	0,08	0,00	63,34	0,01	0,00	27,55	0,02	0,01	0,00	0,00	91,07	Am. F - 6
159	0,08	0,02	0,03	63,56	0,00	0,00	27,47	0,04	0,00	0,00	0,01	91,21	Am. F - 7
160	0,11	0,04	0,00	64,55	0,03	0,01	27,27	0,00	0,00	0,00	0,00	92,00	Am. F - 8
161	0,11	0,06	0,00	64,88	0,03	0,01	27,67	0,01	0,00	0,00	0,00	92,76	Am. F - 9
162	0,13	0,02	0,03	64,30	0,02	0,00	27,54	0,00	0,00	0,00	0,00	92,04	Am. F - 10
163	0,11	0,02	0,02	64,23	0,06	0,01	27,66	0,00	0,01	0,01	0,02	92,15	Am. F - 11
164	0,08	0,01	0,00	64,15	0,04	0,01	27,43	0,00	0,00	0,00	0,00	91,71	Am. F - 12
165	0,08	0,00	0,00	63,67	0,04	0,01	27,54	0,02	0,07	0,01	0,00	91,40	Am. F - 13

166	0,10	0,08	0,03	62,63	0,02	0,00	27,83	0,02	0,01	0,00	0,00	90,72	Am. F - 14
167	0,07	0,05	0,00	63,81	0,00	0,00	27,57	0,01	0,02	0,00	0,00	91,52	Am. F - 15
168	0,11	0,00	0,02	64,70	0,00	0,00	27,51	0,01	0,00	0,00	0,00	92,35	Am. F - 16
169	0,10	0,00	0,02	64,24	0,04	0,01	27,52	0,01	0,00	0,00	0,00	91,95	Am. F - 17
170	0,10	0,08	0,03	63,63	0,04	0,01	27,55	0,01	0,00	0,01	0,00	91,46	Am. F - 18
171	0,07	0,10	0,02	65,33	0,03	0,00	27,77	0,01	0,00	0,00	0,02	93,34	Am. F - 19
172	0,07	0,00	0,03	64,66	0,00	0,00	27,17	0,00	0,04	0,02	0,00	91,98	Am. F - 20
173	0,11	0,06	0,03	64,85	0,06	0,01	27,61	0,02	0,26	0,01	0,00	92,91	Am. F - 21
174	0,10	0,08	0,00	64,75	0,02	0,00	27,37	0,00	0,16	0,01	0,01	92,43	Am. F - 22
175	0,10	0,00	0,06	65,33	0,08	0,00	27,47	0,01	0,09	0,01	0,02	93,13	Am. F - 23
176	0,08	0,01	0,04	64,96	0,00	0,01	27,34	0,00	0,06	0,02	0,01	92,51	Am. F - 24
177	0,12	0,00	0,02	65,05	0,06	0,00	27,11	0,00	0,19	0,01	0,01	92,49	Am. F - 25
178	0,11	0,02	0,06	65,59	0,04	0,01	27,55	0,02	0,00	0,01	0,02	93,42	Am. F - 26
179	0,13	0,01	0,05	65,04	0,00	0,01	27,32	0,02	0,09	0,01	0,01	92,63	Am. F - 27
180	0,09	0,03	0,02	64,13	0,02	0,00	27,38	0,00	0,00	0,01	0,00	91,67	Am. F - 28
181	0,11	0,07	0,01	64,39	0,04	0,00	27,46	0,01	0,06	0,01	0,00	92,13	Am. F - 29
182	0,10	0,08	0,00	65,21	0,00	0,00	27,31	0,02	0,06	0,01	0,00	92,77	Am. F - 30
183	0,15	0,06	0,00	65,84	0,49	0,00	26,96	0,02	0,00	0,01	0,00	93,53	Am. 1 - 1
184	0,14	0,05	0,04	65,99	0,47	0,02	26,91	0,03	0,00	0,00	0,00	93,65	Am. 1 - 2
185	0,16	0,10	0,02	65,31	0,56	0,01	27,13	0,02	0,00	0,00	0,02	93,32	Am. 1 - 3
186	0,16	0,00	0,01	65,75	0,51	0,01	27,25	0,00	0,20	0,00	0,03	93,84	Am. 1 - 4
187	0,13	0,08	0,04	64,85	0,51	0,00	27,43	0,02	0,08	0,00	0,00	93,08	Am. 1 - 5
188	0,19	0,08	0,00	56,53	0,39	0,04	26,73	0,03	0,18	0,01	0,02	84,10	Am. 1 - 6
189	0,16	0,04	0,00	63,05	0,53	0,01	27,34	0,00	0,00	0,01	0,01	91,15	Am. 1 - 7
190	0,15	0,00	0,00	62,28	0,51	0,00	27,43	0,01	0,00	0,01	0,00	90,39	Am. 1 - 8
191	0,18	0,08	0,06	65,87	0,55	0,02	26,97	0,01	0,02	0,01	0,03	93,77	Am. 1 - 9
192	0,13	0,07	0,00	65,74	0,51	0,00	27,43	0,00	0,04	0,00	0,00	93,90	Am. 1 - 10
193	0,14	0,07	0,00	66,46	0,55	0,00	27,09	0,00	0,00	0,01	0,01	94,33	Am. 1 - 11
194	0,15	0,09	0,00	66,33	0,48	0,01	27,30	0,03	0,00	0,03	0,01	94,43	Am. 1 - 12
195	0,12	0,11	0,02	66,34	0,56	0,01	26,87	0,01	0,01	0,00	0,04	94,08	Am. 1 - 13
196	0,23	0,13	0,00	65,46	0,45	0,06	27,12	0,07	0,00	0,07	0,03	93,61	Am. 1 - 14
197	0,12	0,10	0,01	64,79	0,51	0,00	27,66	0,01	0,01	0,00	0,04	93,24	Am. 1 - 15
198	0,16	0,07	0,00	66,89	0,59	0,01	27,56	0,01	0,30	0,00	0,02	95,47	Am. 1 - 16
199	0,15	0,06	0,01	65,81	0,54	0,02	27,63	0,02	0,00	0,04	0,03	94,31	Am. 1 - 17
200	0,17	0,09	0,00	63,47	0,60	0,02	27,45	0,02	0,01	0,00	0,01	91,83	Am. 1 - 18
201	0,16	0,11	0,00	66,68	0,48	0,02	27,24	0,03	0,07	0,00	0,03	94,79	Am. 1 - 19
202	0,18	0,12	0,02	66,30	0,52	0,01	27,23	0,02	0,00	0,01	0,02	94,43	Am. 1 - 20
203	0,19	0,03	0,01	65,72	0,42	0,01	27,30	0,01	0,08	0,01	0,03	93,78	Am. 1 - 21
204	0,12	0,13	0,03	64,89	0,45	0,00	27,28	0,02	0,00	0,01	0,01	92,91	Am. 1 - 22
205	0,17	0,09	0,02	65,25	0,52	0,01	27,50	0,02	0,00	0,00	0,02	93,58	Am. 1 - 23
206	0,14	0,06	0,03	65,31	0,47	0,00	27,32	0,00	0,07	0,02	0,01	93,39	Am. 1 - 24
207	0,15	0,11	0,01	65,38	0,46	0,01	27,36	0,02	0,00	0,00	0,02	93,51	Am. 1 - 25
208	0,17	0,11	0,02	66,83	0,44	0,01	26,83	0,00	0,07	0,00	0,01	94,46	Am. 1 - 26
209	0,19	0,08	0,01	66,37	0,55	0,01	26,54	0,02	0,00	0,01	0,00	93,76	Am. 1 - 27
210	0,13	0,06	0,01	65,36	0,54	0,01	27,48	0,01	0,37	0,00	0,01	93,81	Am. 1 - 28
211	0,14	0,01	0,00	66,16	0,64	0,02	27,41	0,02	0,00	0,00	0,00	94,40	Am. 1 - 29
212	0,14	0,12	0,00	66,48	0,51	0,00	27,23	0,01	0,23	0,00	0,00	94,62	Am. 1 - 30
243	10,78	0,00	0,09	69,18	0,00	0,02	19,62	0,14	0,00	0,10	0,00	99,92	Am. 3 - 1
244	10,60	0,00	0,09	68,11	0,00	0,01	19,54	0,11	0,00	0,07	0,01	98,54	Am. 3 - 2
245	10,56	0,01	0,06	66,35	0,02	0,01	19,36	0,14	0,06	0,14	0,01	96,71	Am. 3 - 3
246	10,57	0,01	0,16	68,72	0,00	0,00	19,71	0,12	0,00	0,16	0,00	99,45	Am. 3 - 4
247	10,51	0,00	0,16	67,87	0,00	0,00	19,56	0,13	0,00	0,16	0,00	98,39	Am. 3 - 5
248	10,33	0,00	0,11	67,97	0,01	0,01	19,76	0,25	0,00	0,11	0,00	98,54	Am. 3 - 6
249	10,35	0,01	0,13	69,08	0,03	0,01	19,72	0,21	0,25	0,09	0,02	99,79	Am. 3 - 7
250	10,40	0,03	0,05	69,21	0,00	0,01	19,61	0,18	0,02	0,08	0,01	99,57	Am. 3 - 8
251	10,19	0,00	0,10	69,49	0,00	0,02	19,36	0,21	0,00	0,09	0,03	99,49	Am. 3 - 9
252	10,58	0,00	0,07	68,14	0,03	0,00	19,54	0,15	0,00	0,09	0,02	98,62	Am. 3 - 10
253	10,41	0,08	0,08	68,26	0,00	0,02	19,70	0,18	0,05	0,11	0,00	98,85	Am. 3 - 11
254	10,50	0,01	0,07	67,12	0,00	0,01	19,99	0,21	0,00	0,14	0,00	98,06	Am. 3 - 12
255	10,51	0,01	0,06	69,24	0,02	0,00	19,85	0,16	0,00	0,12	0,00	99,96	Am. 3 - 13
256	10,59	0,04	0,04	68,87	0,00	0,00	19,70	0,19	0,10	0,09	0,01	99,58	Am. 3 - 14
257	10,46	0,00	0,08	69,91	0,03	0,00	19,68	0,10	0,01	0,11	0,02	100,41	Am. 3 - 15
258	10,42	0,00	0,08	70,16	0,05	0,00	19,59	0,12	0,24	0,10	0,01	100,66	Am. 3 - 16

259	10,49	0,04	0,08	69,47	0,01	0,01	19,66	0,19	0,00	0,10	0,01	100,06	Am. 3 - 17
260	10,21	0,03	0,06	69,65	0,00	0,00	19,81	0,18	0,06	0,11	0,01	100,09	Am. 3 - 18
261	10,28	0,00	0,08	67,54	0,05	0,01	19,44	0,09	0,00	0,19	0,03	97,71	Am. 3 - 19
262	10,49	0,01	0,09	69,23	0,02	0,01	19,82	0,10	0,00	0,03	0,00	99,81	Am. 3 - 20
263	10,61	0,01	0,04	68,45	0,01	0,00	19,69	0,09	0,01	0,08	0,00	98,97	Am. 3 - 21
264	10,53	0,04	0,07	68,51	0,00	0,00	19,48	0,10	0,00	0,13	0,00	98,86	Am. 3 - 22
265	10,17	0,08	0,11	67,35	0,00	0,01	19,85	0,25	0,00	0,14	0,03	97,98	Am. 3 - 23
266	10,41	0,01	0,09	68,15	0,00	0,00	19,60	0,21	0,04	0,13	0,00	98,62	Am. 3 - 24
267	10,34	0,05	0,07	65,06	0,00	0,01	19,42	0,19	0,06	0,13	0,00	95,29	Am. 3 - 25
268	10,48	0,04	0,11	69,78	0,01	0,00	19,72	0,11	0,19	0,13	0,00	100,50	Am. 3 - 26
269	10,48	0,00	0,08	69,75	0,02	0,00	19,64	0,16	0,09	0,13	0,02	100,34	Am. 3 - 27
270	10,46	0,00	0,10	68,85	0,00	0,00	19,44	0,08	0,00	0,05	0,00	98,98	Am. 3 - 28
271	10,43	0,00	0,03	69,44	0,00	0,01	19,53	0,10	0,00	0,12	0,00	99,67	Am. 3 - 29
272	10,47	0,02	0,13	69,74	0,00	0,02	20,03	0,11	0,00	0,13	0,00	100,65	Am. 3 - 30
273	0,14	0,08	0,00	65,87	0,39	0,01	27,01	0,01	0,00	0,01	0,01	93,51	Am. 4 - 1
274	0,11	0,06	0,00	62,60	0,37	0,00	27,41	0,00	0,00	0,00	0,01	90,56	Am. 4 - 4
275	0,06	0,04	0,00	64,56	0,50	0,01	27,55	0,01	0,19	0,00	0,00	92,84	Am. 4 - 7
276	0,07	0,05	0,00	62,95	3,56	0,02	25,93	0,02	0,00	0,07	0,15	92,82	Am. 4 - 10
277	0,15	0,06	0,01	65,45	0,60	0,00	26,93	0,00	0,00	0,00	0,02	93,22	Am. 4 - 13
278	0,12	0,11	0,00	62,67	0,32	0,01	27,34	0,00	0,00	0,00	0,02	90,58	Am. 4 - 16
279	0,14	0,09	0,05	60,33	0,26	0,01	27,35	0,02	0,00	0,02	0,00	88,27	Am. 4 - 19
280	0,02	0,00	0,01	82,47	0,04	0,00	0,03	0,01	0,10	0,01	0,02	82,68	Am. 4 - 22
282	0,14	0,12	0,01	61,10	0,43	0,01	27,26	0,02	0,22	0,00	0,01	89,23	Am. 4 - 27
283	10,83	0,01	0,17	68,21	0,00	0,00	19,79	0,09	0,01	0,04	0,00	99,15	Am. 5 - 1
284	10,88	0,03	0,02	68,79	0,00	0,01	19,61	0,18	0,18	0,00	0,00	99,63	Am. 5 - 4
285	10,43	0,01	0,34	66,10	0,00	0,00	19,74	0,15	0,00	0,13	0,00	96,90	Am. 5 - 7
286	10,31	0,00	0,17	65,18	0,04	0,01	19,66	0,26	0,00	0,12	0,00	95,74	Am. 5 - 10
287	10,41	0,04	0,28	67,68	0,05	0,00	19,91	0,11	0,00	0,08	0,01	98,58	Am. 5 - 13
288	10,48	0,01	0,30	67,40	0,00	0,00	20,08	0,22	0,00	0,16	0,00	98,65	Am. 5 - 16
289	10,50	0,00	0,26	68,35	0,00	0,01	19,93	0,12	0,10	0,10	0,01	99,32	Am. 5 - 19
290	10,32	0,03	0,25	67,69	0,00	0,01	20,03	0,22	0,29	0,12	0,01	98,84	Am. 5 - 22
291	10,32	0,00	0,05	68,35	0,01	0,01	19,78	0,06	0,00	0,02	0,01	98,60	Am. 5 - 25
292	10,39	0,00	0,03	67,09	0,06	0,00	19,90	0,07	0,00	0,04	0,00	97,57	Am. 5 - 29
293	10,55	0,02	0,56	67,58	0,02	0,00	19,93	0,10	0,10	0,07	0,00	98,88	Am. 6 - 1
294	10,45	0,00	0,48	65,56	0,01	0,02	20,11	0,11	0,01	0,09	0,00	96,82	Am. 6 - 4
295	10,51	0,00	0,19	67,44	0,02	0,00	19,78	0,22	0,16	0,02	0,00	98,26	Am. 6 - 7
296	10,66	0,04	0,39	68,09	0,04	0,02	20,17	0,11	0,00	0,04	0,00	99,55	Am. 6 - 10
297	10,35	0,05	0,58	65,81	0,03	0,00	20,02	0,13	0,09	0,05	0,00	97,07	Am. 6 - 13
298	10,49	0,03	0,55	67,15	0,00	0,00	19,80	0,10	0,04	0,05	0,00	98,19	Am. 6 - 16
299	10,43	0,00	0,43	67,17	0,00	0,00	20,08	0,11	0,08	0,04	0,03	98,32	Am. 6 - 19
300	10,35	0,01	0,48	67,46	0,00	0,02	20,21	0,11	0,04	0,12	0,00	98,78	Am. 6 - 22
301	10,21	0,00	0,62	67,43	0,00	0,00	19,94	0,12	0,00	0,05	0,00	98,37	Am. 6 - 25
302	10,45	0,00	0,33	68,33	0,01	0,00	19,96	0,11	0,05	0,07	0,02	99,30	Am. 6 - 28

Tabela III.2 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em feldspatos e espodumênios (03/06/2014). Amostras: A, microclínio Urucum; B, microclínio Cachoeira; C, microclínio Santa Rosa (branco); D, microclínio Santa Rosa (rosado); E, espodumênio Resplendor; F, espodumênio Santa Rosa (“palmito”); G, espodumênio Santa Rosa (rosado); H, espodumênio Chapadinha.

Group: Geologia_Mario									
Sample: CHD030614-ESP									
Weight percent									
No.	Na ₂ O	MnO	K ₂ O	SiO ₂	FeO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Total	Comment
4	0,28	0,06	15,74	65,05	0,00	0,23	18,25	99,60	Am A - Grao 1 - 1
5	0,73	0,00	15,10	64,59	0,00	0,10	18,24	98,76	Am A - Grao 1 - 2
6	0,90	0,00	14,91	65,71	0,00	0,06	18,46	100,04	Am A - Grao 1 - 3
7	0,85	0,04	14,98	65,54	0,00	0,11	18,57	100,09	Am A - Grao 1 - 4
8	0,60	0,03	15,34	65,78	0,00	0,11	18,35	100,21	Am A - Grao 1 - 5
9	0,64	0,00	15,07	66,05	0,00	0,12	18,75	100,64	Am A - Grao 2 - 1
10	0,75	0,00	15,38	66,10	0,04	0,10	18,49	100,86	Am A - Grao 2 - 2
11	0,62	0,00	15,42	66,01	0,05	0,04	18,46	100,61	Am A - Grao 2 - 3
12	0,55	0,00	15,76	65,78	0,06	0,13	18,19	100,47	Am A - Grao 2 - 4
13	0,53	0,00	15,59	65,61	0,01	0,07	18,29	100,09	Am A - Grao 2 - 5
15	0,59	0,00	15,12	65,95	0,00	0,17	18,22	100,04	Am A - Grao 3 - 2
16	0,52	0,00	15,62	65,66	0,01	0,14	18,37	100,31	Am A - Grao 3 - 3
17	0,58	0,00	15,40	66,07	0,01	0,11	18,43	100,60	Am A - Grao 3 - 4
18	0,63	0,00	15,59	64,59	0,02	0,09	18,32	99,25	Am A - Grao 3 - 5
19	0,57	0,02	15,37	65,72	0,05	0,09	18,28	100,09	Am A - Grao 4 - 1
20	0,49	0,00	15,59	65,69	0,00	0,09	18,52	100,38	Am A - Grao 4 - 2
21	0,57	0,00	15,66	65,64	0,00	0,09	18,57	100,53	Am A - Grao 4 - 3
22	10,90	0,00	0,18	69,72	0,00	0,03	19,42	100,24	Am A - Grao 4 - 4
23	1,24	0,00	14,60	64,90	0,02	0,10	18,38	99,25	Am A - Grao 4 - 5
24	0,56	0,00	15,51	65,69	0,00	0,13	18,46	100,36	Am A - Grao 5 - 1
25	0,66	0,03	15,22	65,96	0,00	0,07	18,29	100,24	Am A - Grao 5 - 2
26	0,47	0,05	15,48	65,27	0,01	0,19	18,21	99,68	Am A - Grao 5 - 3
27	10,71	0,00	0,06	69,18	0,01	0,06	19,36	99,38	Am A - Grao 5 - 4
28	10,95	0,00	0,08	68,23	0,00	0,05	19,16	98,47	Am A - Grao 5 - 5
29	0,53	0,00	15,32	65,38	0,07	0,36	18,86	100,52	Am B - Grao 1 - 1
30	0,56	0,00	14,96	65,17	0,00	0,31	18,64	99,65	Am B - Grao 1 - 2
31	0,24	0,00	16,00	65,18	0,00	0,12	18,24	99,77	Am B - Grao 1 - 3
32	0,31	0,01	15,44	63,81	0,01	0,31	18,47	98,35	Am B - Grao 1 - 4
33	10,82	0,00	0,12	68,17	0,00	0,20	19,45	98,75	Am B - Grao 1 - 5
34	10,68	0,03	0,10	69,22	0,03	0,11	19,66	99,84	Am B - Grao 2 - 1
35	10,86	0,02	0,10	69,63	0,00	0,02	19,41	100,05	Am B - Grao 2 - 2
36	0,23	0,00	15,62	65,98	0,01	0,02	18,28	100,14	Am B - Grao 2 - 3
37	11,08	0,00	0,09	70,03	0,00	0,03	19,30	100,54	Am B - Grao 2 - 4
38	10,80	0,00	0,18	68,76	0,00	0,05	19,22	99,01	Am B - Grao 2 - 5
39	0,46	0,00	15,25	64,85	0,04	0,27	18,61	99,48	Am B - Grao 3 - 1
40	0,52	0,00	15,36	65,10	0,00	0,30	18,47	99,75	Am B - Grao 3 - 2
41	0,58	0,00	15,26	64,87	0,09	0,28	18,47	99,56	Am B - Grao 3 - 3
42	0,45	0,00	15,66	63,85	0,00	0,29	18,26	98,51	Am B - Grao 3 - 4
43	0,18	0,00	15,74	64,94	0,00	0,09	18,03	98,97	Am B - Grao 3 - 5
44	0,62	0,00	14,86	65,34	0,00	0,29	18,58	99,69	Am B - Grao 4 - 1
45	0,24	0,03	15,87	65,18	0,00	0,00	18,28	99,59	Am B - Grao 4 - 2
46	0,27	0,00	15,74	65,51	0,00	0,08	18,20	99,79	Am B - Grao 4 - 3
47	0,26	0,00	15,58	64,55	0,00	0,26	18,27	98,92	Am B - Grao 4 - 4
48	10,79	0,00	0,14	68,81	0,01	0,00	19,36	99,11	Am B - Grao 4 - 5
49	0,32	0,00	15,93	65,01	0,00	0,57	18,76	100,59	Am C - Grao 1 - 1
50	0,65	0,00	15,64	65,07	0,01	0,72	18,75	100,84	Am C - Grao 1 - 2
51	0,20	0,01	16,39	64,20	0,01	0,12	18,32	99,25	Am C - Grao 1 - 3
52	0,50	0,00	15,63	64,58	0,01	0,53	18,79	100,03	Am C - Grao 1 - 4
53	0,65	0,00	15,45	65,07	0,00	0,54	18,79	100,50	Am C - Grao 1 - 5
54	0,24	0,00	16,36	64,76	0,00	0,50	18,59	100,45	Am C - Grao 2 - 1
55	0,66	0,00	15,40	65,13	0,00	0,63	18,87	100,69	Am C - Grao 2 - 2
56	10,81	0,00	0,09	68,11	0,00	0,37	19,69	99,07	Am C - Grao 2 - 3
57	0,52	0,00	15,74	64,71	0,01	0,57	18,67	100,23	Am C - Grao 2 - 4

58	0,28	0,01	16,20	63,35	0,14	0,56	18,42	98,95	Am C - Grao 2 - 5
59	0,89	0,00	14,96	65,38	0,00	0,63	18,81	100,67	Am C - Grao 3 - 1
60	0,22	0,00	16,19	63,93	0,00	0,37	18,25	98,96	Am C - Grao 3 - 2
61	0,24	0,00	16,01	64,02	0,00	0,61	18,51	99,40	Am C - Grao 3 - 3
62	0,22	0,00	15,83	64,75	0,00	0,56	18,79	100,14	Am C - Grao 3 - 4
63	0,96	0,00	14,90	64,93	0,03	0,56	18,82	100,19	Am C - Grao 3 - 5
64	10,50	0,05	0,13	68,72	0,05	0,42	19,73	99,60	Am C - Grao 3 - 6
65	0,76	0,05	15,24	64,85	0,00	0,64	18,76	100,30	Am C - Grao 4 - 1
66	0,52	0,03	15,55	65,20	0,00	0,52	18,53	100,34	Am C - Grao 4 - 2
67	0,26	0,01	16,20	63,95	0,00	0,58	18,44	99,44	Am C - Grao 4 - 3
68	0,33	0,07	15,90	64,18	0,03	0,56	18,46	99,53	Am C - Grao 4 - 4
69	0,67	0,03	15,43	65,06	0,10	0,47	18,82	100,57	Am C - Grao 4 - 5
70	10,78	0,00	0,10	69,01	0,00	0,14	19,91	99,93	Am C - Grao 4 - 6
71	0,54	0,01	15,53	64,89	0,01	0,52	18,69	100,20	Am C - Grao 5 - 1
72	0,25	0,01	16,12	64,10	0,04	0,53	18,88	99,92	Am C - Grao 5 - 2
73	0,22	0,00	15,93	65,25	0,02	0,53	18,58	100,54	Am C - Grao 5 - 3
74	0,51	0,00	15,43	65,07	0,00	0,54	18,92	100,47	Am C - Grao 5 - 4
75	0,19	0,03	16,11	65,26	0,03	0,24	18,30	100,15	Am C - Grao 5 - 5
76	10,83	0,02	0,11	69,08	0,00	0,32	19,69	100,05	Am C - Grao 5 - 6
77	0,10	0,00	16,24	65,06	0,00	0,00	18,43	99,83	Am D - Grao 1 - 1
78	0,09	0,00	16,35	65,37	0,03	0,01	18,41	100,26	Am D - Grao 1 - 2
79	0,08	0,01	16,17	64,86	0,03	0,00	18,43	99,56	Am D - Grao 1 - 3
80	0,09	0,00	16,10	64,40	0,05	0,06	18,13	98,82	Am D - Grao 1 - 4
81	0,06	0,00	15,96	65,09	0,06	0,05	18,28	99,50	Am D - Grao 1 - 5
82	0,03	0,00	0,00	0,04	0,06	51,07	33,93	85,13	Am D - Grao 1 - 6
83	0,09	0,00	15,96	64,89	0,04	0,01	18,10	99,08	Am D - Grao 2 - 1
84	0,10	0,03	15,99	65,17	0,00	0,04	18,42	99,75	Am D - Grao 2 - 2
85	0,14	0,00	16,05	64,52	0,00	0,00	18,54	99,25	Am D - Grao 2 - 3
86	0,09	0,02	15,92	65,12	0,00	0,00	18,53	99,68	Am D - Grao 2 - 4
87	0,09	0,01	15,88	65,40	0,00	0,01	18,05	99,44	Am D - Grao 2 - 5
88	0,10	0,09	15,74	63,64	0,05	0,97	17,57	98,17	Am D - Grao 3 - 1
89	0,08	0,04	16,04	64,73	0,15	0,03	18,29	99,36	Am D - Grao 3 - 2
90	0,08	0,00	16,04	65,58	0,01	0,02	18,07	99,80	Am D - Grao 3 - 3
91	0,06	0,00	16,24	64,71	0,06	0,47	18,14	99,69	Am D - Grao 3 - 4
92	0,13	0,05	15,68	63,98	0,07	0,08	18,86	98,84	Am D - Grao 3 - 5
93	0,11	0,00	16,07	64,45	0,00	0,04	18,34	99,01	Am D - Grao 4 - 1
94	0,11	0,04	15,92	64,52	0,01	0,01	18,36	98,96	Am D - Grao 4 - 2
95	0,04	0,00	16,34	65,52	0,06	0,04	18,23	100,23	Am D - Grao 4 - 3
96	0,07	0,00	15,94	64,55	0,04	0,00	18,50	99,11	Am D - Grao 4 - 4
97	0,08	0,00	15,87	65,27	0,06	0,05	18,31	99,63	Am D - Grao 4 - 5
98	0,07	0,01	16,04	63,73	0,02	0,06	18,47	98,40	Am D - Grao 5 - 1
99	0,08	0,00	16,25	65,32	0,00	0,08	18,25	99,99	Am D - Grao 5 - 2
100	0,07	0,02	16,00	64,90	0,08	0,03	18,29	99,38	Am D - Grao 5 - 3
101	0,11	0,01	15,81	64,55	0,00	0,01	18,33	98,81	Am D - Grao 5 - 4
102	0,12	0,02	16,16	65,31	0,05	0,00	18,35	100,00	Am D - Grao 5 - 5
103	0,11	0,12	0,00	65,92	0,01	0,00	26,94	93,10	Am E - Grao 1 - 1
104	0,12	0,05	0,00	65,80	0,00	0,01	27,16	93,15	Am E - Grao 1 - 2
105	0,15	0,11	0,00	65,97	0,06	0,00	26,89	93,18	Am E - Grao 1 - 3
106	0,12	0,05	0,01	66,10	0,08	0,03	27,21	93,60	Am E - Grao 1 - 4
107	0,13	0,03	0,00	65,63	0,03	0,01	26,82	92,65	Am E - Grao 1 - 5
108	0,10	0,07	0,01	65,50	0,04	0,02	26,69	92,43	Am E - Grao 2 - 1
109	0,13	0,09	0,02	65,71	0,07	0,00	26,81	92,83	Am E - Grao 2 - 2
110	0,14	0,15	0,01	65,78	0,05	0,01	27,01	93,14	Am E - Grao 2 - 3
111	0,09	0,15	0,03	64,93	0,03	0,01	26,73	91,97	Am E - Grao 2 - 4
112	0,14	0,06	0,01	66,33	0,08	0,01	27,21	93,85	Am E - Grao 2 - 5
113	0,12	0,11	0,00	64,68	0,03	0,00	26,54	91,48	Am E - Grao 3 - 1
114	0,15	0,08	0,01	66,17	0,02	0,00	27,24	93,67	Am E - Grao 3 - 2
115	0,11	0,00	0,02	65,77	0,04	0,03	26,88	92,85	Am E - Grao 3 - 3
116	0,12	0,11	0,01	65,18	0,03	0,03	26,71	92,19	Am E - Grao 3 - 4
117	0,10	0,08	0,00	65,46	0,03	0,00	27,01	92,68	Am E - Grao 3 - 5
118	0,11	0,07	0,00	65,51	0,01	0,03	27,15	92,87	Am E - Grao 4 - 1
119	0,12	0,06	0,03	65,63	0,08	0,00	27,23	93,14	Am E - Grao 4 - 2
120	0,11	0,08	0,00	65,49	0,04	0,05	27,18	92,94	Am E - Grao 4 - 3

121	0,08	0,06	0,00	66,04	0,07	0,03	27,16	93,43	Am E - Grao 4 - 4
122	0,12	0,07	0,01	65,99	0,05	0,00	26,84	93,07	Am E - Grao 4 - 5
123	0,13	0,06	0,00	65,92	0,01	0,01	27,34	93,48	Am E - Grao 5 - 1
124	0,09	0,10	0,00	66,07	0,02	0,00	27,14	93,43	Am E - Grao 5 - 2
125	0,13	0,01	0,01	65,71	0,04	0,03	26,83	92,76	Am E - Grao 5 - 3
126	0,15	0,13	0,01	65,58	0,04	0,03	27,05	92,97	Am E - Grao 5 - 4
127	0,11	0,07	0,01	66,27	0,01	0,02	27,36	93,84	Am E - Grao 5 - 5
128	0,05	0,00	0,01	83,04	0,06	0,00	14,09	97,25	Am F - Grao 1 - 1
129	0,08	0,06	0,02	67,78	0,03	0,00	24,78	92,75	Am F - Grao 1 - 2
130	0,05	0,00	0,01	76,22	0,05	0,00	18,74	95,07	Am F - Grao 1 - 3
131	10,07	0,00	0,11	68,85	0,05	0,03	20,01	99,12	Am F - Grao 1 - 4
132	0,08	0,08	0,01	68,30	0,00	0,00	24,58	93,04	Am F - Grao 1 - 5
133	0,08	0,09	0,02	65,42	0,00	0,00	27,23	92,83	Am F - Grao 2 - 1
134	0,11	0,08	0,00	65,43	0,03	0,00	27,52	93,17	Am F - Grao 2 - 2
135	0,10	0,05	0,01	65,56	0,05	0,00	26,80	92,57	Am F - Grao 2 - 3
136	0,10	0,05	0,01	66,20	0,05	0,00	27,03	93,43	Am F - Grao 2 - 4
137	0,09	0,09	0,00	65,40	0,02	0,00	26,90	92,51	Am F - Grao 2 - 5
138	0,10	0,02	0,02	65,22	0,11	0,00	26,76	92,21	Am F - Grao 3 - 1
139	0,10	0,08	0,00	65,61	0,00	0,00	27,24	93,03	Am F - Grao 3 - 2
140	0,10	0,06	0,00	65,66	0,08	0,02	27,40	93,32	Am F - Grao 3 - 3
141	0,11	0,02	0,01	65,61	0,04	0,00	27,23	93,01	Am F - Grao 3 - 4
142	0,10	0,06	0,00	65,75	0,05	0,00	27,20	93,17	Am F - Grao 3 - 5
143	0,10	0,02	0,01	64,92	0,06	0,00	27,24	92,35	Am F - Grao 4 - 1
144	0,11	0,00	0,00	65,54	0,05	0,00	26,92	92,62	Am F - Grao 4 - 2
145	0,10	0,00	0,00	65,71	0,00	0,02	27,30	93,13	Am F - Grao 4 - 3
146	0,08	0,04	0,00	63,25	0,04	0,00	27,37	90,78	Am F - Grao 4 - 4
147	0,08	0,07	0,01	65,58	0,05	0,00	26,97	92,75	Am F - Grao 4 - 5
148	10,38	0,00	0,73	69,18	0,02	0,02	19,34	99,67	Am F - Grao 5 - 1
149	0,44	0,02	15,41	64,90	0,00	0,23	18,29	99,28	Am F - Grao 5 - 2
150	0,18	0,01	15,53	64,35	0,00	0,15	18,59	98,82	Am F - Grao 5 - 3
151	0,31	0,01	15,66	64,46	0,06	0,31	18,54	99,36	Am F - Grao 5 - 4
152	0,56	0,00	15,24	64,82	0,00	0,38	18,70	99,70	Am F - Grao 5 - 5
153	0,12	0,10	0,02	66,07	0,00	0,01	27,47	93,79	Am G - Grao 1 - 1
154	0,08	0,03	0,01	65,69	0,02	0,00	27,43	93,25	Am G - Grao 1 - 2
155	0,13	0,04	0,00	66,19	0,00	0,00	27,19	93,55	Am G - Grao 1 - 3
156	0,09	0,00	0,01	65,88	0,02	0,00	27,31	93,32	Am G - Grao 1 - 4
157	0,06	0,03	0,00	66,66	0,00	0,00	27,24	93,99	Am G - Grao 1 - 5
158	0,08	0,05	0,01	66,00	0,00	0,03	27,33	93,50	Am G - Grao 2 - 1
159	0,09	0,09	0,00	65,75	0,00	0,03	27,34	93,28	Am G - Grao 2 - 2
160	0,12	0,00	0,00	66,10	0,00	0,00	26,81	93,02	Am G - Grao 2 - 3
161	0,11	0,00	0,01	66,23	0,00	0,03	27,28	93,66	Am G - Grao 2 - 4
162	0,10	0,08	0,01	66,17	0,03	0,05	27,62	94,06	Am G - Grao 2 - 5
163	0,08	0,05	0,00	66,28	0,05	0,00	27,55	94,01	Am G - Grao 3 - 1
164	0,08	0,11	0,00	65,92	0,01	0,00	27,76	93,88	Am G - Grao 3 - 2
165	0,09	0,15	0,01	66,47	0,04	0,00	27,28	94,02	Am G - Grao 3 - 3
166	0,09	0,09	0,00	66,05	0,00	0,01	27,06	93,30	Am G - Grao 3 - 4
167	0,08	0,07	0,01	65,84	0,01	0,00	26,96	92,96	Am G - Grao 3 - 5
168	0,09	0,05	0,00	65,77	0,01	0,05	27,33	93,29	Am G - Grao 4 - 1
169	0,12	0,00	0,01	66,33	0,06	0,00	27,47	94,00	Am G - Grao 4 - 2
170	0,10	0,03	0,10	66,40	0,06	0,03	27,23	93,95	Am G - Grao 4 - 3
171	0,12	0,00	0,00	66,44	0,05	0,02	27,38	94,02	Am G - Grao 4 - 4
172	0,12	0,02	0,00	65,93	0,00	0,00	27,45	93,53	Am G - Grao 4 - 5
173	0,10	0,05	0,03	65,89	0,00	0,00	26,91	92,97	Am G - Grao 5 - 1
174	0,09	0,06	0,00	65,84	0,00	0,03	27,02	93,05	Am G - Grao 5 - 2
175	0,08	0,16	0,00	65,76	0,00	0,05	27,44	93,51	Am G - Grao 5 - 3
176	0,08	0,08	0,00	65,74	0,05	0,03	27,09	93,06	Am G - Grao 5 - 4
177	0,10	0,06	0,00	65,29	0,00	0,00	27,41	92,86	Am G - Grao 5 - 5
178	0,16	0,18	0,01	64,98	0,66	0,00	26,46	92,43	Am H - Grao 1 - 1
179	0,12	0,06	0,00	65,36	0,63	0,05	26,61	92,83	Am H - Grao 1 - 2
180	0,15	0,07	0,00	66,04	0,61	0,03	26,79	93,69	Am H - Grao 1 - 3
181	0,13	0,07	0,02	65,84	0,61	0,01	26,76	93,45	Am H - Grao 1 - 4
182	0,11	0,11	0,01	65,46	0,58	0,00	26,99	93,27	Am H - Grao 1 - 5
183	0,09	0,14	0,01	65,87	0,51	0,01	26,95	93,57	Am H - Grao 2 - 1

184	0,11	0,07	0,00	65,87	0,62	0,00	26,94	93,61	Am H - Grao 2 - 2
185	0,13	0,02	0,01	65,63	0,45	0,00	26,59	92,84	Am H - Grao 2 - 3
186	0,16	0,04	0,02	65,08	0,62	0,06	26,72	92,69	Am H - Grao 2 - 4
187	0,13	0,07	0,00	66,01	0,64	0,00	26,82	93,67	Am H - Grao 2 - 5
188	0,18	0,02	0,00	65,80	0,81	0,05	26,85	93,72	Am H - Grao 3 - 1
189	0,11	0,02	0,01	66,01	0,62	0,00	26,96	93,73	Am H - Grao 3 - 2
190	0,13	0,08	0,00	65,45	0,65	0,03	26,65	92,99	Am H - Grao 3 - 3
191	0,17	0,07	0,00	65,66	0,80	0,04	26,92	93,65	Am H - Grao 3 - 4
192	0,16	0,04	0,01	65,50	0,56	0,00	26,60	92,87	Am H - Grao 3 - 5
193	0,14	0,10	0,00	65,49	0,89	0,03	27,05	93,70	Am H - Grao 4 - 1
194	0,18	0,02	0,01	65,49	0,68	0,00	26,95	93,32	Am H - Grao 4 - 2
195	0,11	0,00	0,00	65,67	0,63	0,02	26,82	93,25	Am H - Grao 4 - 3
196	0,15	0,01	0,00	65,51	0,72	0,05	26,83	93,26	Am H - Grao 4 - 4
197	0,16	0,00	0,01	65,57	0,64	0,02	26,86	93,25	Am H - Grao 4 - 5
198	0,12	0,04	0,03	66,00	0,53	0,02	26,89	93,63	Am H - Grao 5 - 1
199	0,14	0,15	0,01	65,79	0,64	0,00	26,69	93,42	Am H - Grao 5 - 2
200	0,15	0,04	0,02	65,93	0,65	0,01	26,69	93,48	Am H - Grao 5 - 3
201	0,14	0,09	0,00	66,10	0,68	0,00	27,07	94,10	Am H - Grao 5 - 4
202	0,11	0,15	0,00	66,42	0,55	0,03	27,21	94,46	Am H - Grao 5 - 5

Tabela III.3 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (27/11/2013). As amostras B1 a B11 são as amostras 1 a 11, nesta ordem, das tabelas 4.1 e 1.

Group : Geologia_Mario										%Fantasma no tantalato=5,33 (Estimado graficamente)			
Sample : MC271113-NbTa													
Weight percent										W Fan_ tasma	Delta	Total – W _{fantasma}	
No.	Ta ₂ O ₅	MnO	SnO ₂	FeO	UO ₂	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	WO ₃	Total				Comment
1	30,58	7,72	0,60	11,32	0,29	0,95	48,35	1,23	101,05	B-1-1	1,63	-0,40	99,82
2	30,40	7,66	0,57	11,69	0,35	0,99	48,73	1,57	101,96	B-1-2	1,62	-0,05	100,39
3	30,53	7,46	0,71	11,53	0,31	1,13	47,74	1,60	101,02	B-1-3	1,63	-0,02	99,42
4	30,35	7,16	0,71	12,18	0,24	1,24	47,24	1,42	100,55	B-1-4	1,62	-0,20	99,13
5	30,90	7,70	0,68	12,09	0,20	1,12	48,60	1,14	102,41	B-1-5	1,65	-0,51	101,27
6	40,77	8,33	0,76	10,60	0,01	0,63	38,32	2,15	101,56	B-2-1	2,17	-0,03	99,42
7	39,56	8,24	0,68	10,44	0,11	0,72	40,02	2,19	101,95	B-2-2	2,11	0,08	99,77
8	38,28	7,96	0,64	9,96	0,08	0,62	41,02	2,05	100,60	B-2-3	2,04	0,01	98,55
9	36,59	7,94	0,56	10,04	0,05	0,42	41,09	1,99	98,68	B-2-4	1,95	0,04	96,69
10	37,94	8,09	0,56	10,39	0,06	0,52	41,78	2,16	101,50	B-2-5	2,02	0,14	99,34
11	22,25	5,81	0,92	14,34	0,10	1,85	54,25	1,09	100,60	B-3-1	1,19	-0,09	99,51
12	24,12	5,87	0,88	13,76	0,00	1,95	53,18	1,32	101,08	B-3-2	1,29	0,03	99,77
13	21,46	5,97	0,72	13,95	0,02	1,81	55,25	1,13	100,30	B-3-3	1,14	-0,01	99,17
14	22,56	5,69	0,85	13,32	0,06	1,71	54,68	1,39	100,25	B-3-4	1,20	0,18	98,87
15	20,57	6,22	0,89	13,72	0,23	1,75	55,42	1,15	99,96	B-3-5	1,10	0,06	98,81
16	43,87	8,91	0,88	9,90	0,02	0,34	35,75	2,13	101,80	B-4-1	2,34	-0,21	99,67
17	44,09	8,66	0,69	9,86	0,09	0,51	35,75	2,02	101,66	B-4-2	2,35	-0,33	99,64
18	41,02	8,43	0,76	10,52	0,05	0,76	38,05	2,01	101,60	B-4-3	2,19	-0,18	99,58
19	39,22	8,18	0,62	10,66	0,01	0,57	40,41	2,11	101,78	B-4-4	2,09	0,02	99,67
20	42,82	8,39	0,61	10,36	0,03	0,51	36,54	2,27	101,55	B-4-5	2,28	-0,01	99,27
21	19,27	6,33	0,77	14,47	0,14	1,63	57,89	0,95	101,44	B-5-1	1,03	-0,08	100,49
22	19,98	6,19	0,68	13,94	0,09	1,62	57,77	0,94	101,21	B-5-2	1,06	-0,13	100,27
23	20,28	6,32	0,91	14,05	0,18	1,76	57,33	1,20	102,02	B-5-3	1,08	0,12	100,82
24	20,56	6,45	0,72	14,05	0,18	1,82	56,63	1,14	101,54	B-5-4	1,10	0,04	100,41
25	20,47	6,29	0,68	14,30	0,05	1,73	57,16	1,29	101,97	B-5-5	1,09	0,20	100,68
26	22,55	6,12	1,29	14,00	0,08	2,31	54,80	1,14	102,28	B-6-1	1,20	-0,06	101,14
27	22,58	6,28	1,24	14,13	0,05	2,16	54,94	1,14	102,53	B-6-2	1,20	-0,06	101,39
28	22,59	5,87	1,42	13,86	0,02	2,09	53,75	1,22	100,82	B-6-3	1,20	0,01	99,60
29	22,90	5,67	1,37	14,37	0,12	2,10	53,82	1,13	101,48	B-6-4	1,22	-0,09	100,35
30	20,41	6,14	0,95	13,99	0,13	1,32	56,43	1,17	100,53	B-6-5	1,09	0,08	99,36
31	48,38	6,60	1,61	10,73	0,71	1,89	29,81	2,27	102,00	B-7-1	2,58	-0,31	99,73
32	52,03	4,93	13,86	9,43	0,00	1,38	17,97	2,32	101,90	B-7-2	2,77	-0,46	99,58
33	52,86	4,99	13,52	8,81	0,09	1,28	17,51	2,69	101,76	B-7-3	2,82	-0,12	99,06
34	52,88	5,32	13,25	8,33	0,07	1,23	17,06	2,62	100,77	B-7-4	2,82	-0,20	98,15
35	52,70	5,22	13,42	8,83	0,14	1,32	17,54	2,76	101,92	B-7-5	2,81	-0,05	99,16
36	49,65	9,12	0,54	8,61	0,12	0,34	31,72	2,41	102,50	B-8-1	2,65	-0,24	100,09
37	48,90	9,77	0,55	8,50	0,10	0,40	31,17	2,43	101,80	B-8-2	2,61	-0,18	99,38
38	49,81	9,56	0,64	8,62	0,13	0,29	31,36	2,17	102,56	B-8-3	2,65	-0,48	100,39
39	49,41	9,17	0,67	8,63	0,10	0,39	30,75	2,42	101,53	B-8-4	2,63	-0,21	99,10
40	49,52	9,47	0,68	8,35	0,04	0,37	31,22	2,48	102,13	B-8-5	2,64	-0,16	99,65
41	46,34	5,78	2,00	10,11	0,68	1,96	29,76	2,20	98,83	B-9-1	2,47	-0,27	96,63
42	47,34	6,34	2,13	10,95	0,42	1,94	30,41	2,39	101,92	B-9-2	2,52	-0,13	99,53
43	47,81	7,11	1,25	10,54	0,17	2,11	30,37	2,65	102,01	B-9-3	2,55	0,10	99,36
44	53,02	5,41	14,21	8,84	0,07	1,27	16,59	2,85	102,25	B-9-4	2,83	0,02	99,41
45	53,48	5,64	13,64	9,02	0,07	1,25	16,66	2,55	102,30	B-9-5	2,85	-0,30	99,75
46	53,59	5,40	12,91	8,77	0,03	1,32	17,31	2,35	101,68	B-9-6	2,86	-0,51	99,33
47	31,67	7,88	0,54	12,05	0,03	0,61	47,63	1,90	102,30	B-10-1	1,69	0,21	100,41
48	30,85	7,38	0,70	11,90	0,00	0,91	48,43	1,66	101,82	B-10-2	1,64	0,01	100,17
49	30,69	7,88	0,72	11,53	0,21	1,21	47,73	1,52	101,48	B-10-3	1,64	-0,11	99,96
50	30,83	7,22	0,74	11,96	0,35	1,04	46,74	1,33	100,19	B-10-4	1,64	-0,32	98,86
51	30,64	8,04	0,61	12,15	0,27	0,91	48,41	1,53	102,56	B-10-5	1,63	-0,10	101,02

52	20,04	6,14	0,90	13,68	0,24	1,66	56,81	1,15	100,63	B-11-1	1,07	0,09	99,47
53	20,29	6,01	0,82	14,18	0,14	1,59	55,47	1,15	99,65	B-11-2	1,08	0,07	98,49
54	21,78	6,03	0,87	13,39	0,03	1,71	54,87	1,22	99,89	B-11-3	1,16	0,06	98,67
55	21,81	6,11	0,90	13,91	0,14	1,53	55,22	1,20	100,81	B-11-4	1,16	0,04	99,61
56	21,38	5,90	0,74	13,89	0,49	1,50	53,89	1,32	99,11	B-11-5	1,14	0,18	97,80

OBS:

Conforme constatado por análise qualitativa por WDS e através do software Virtual WDS, não existe concentração detectável de W.

Os valores mostrados na coluna I são devidos à média feita no flanco esquerdo do pico TaKb.

Assim sendo, a coluna I deve ser removida e o total passa a ser a coluna N.

Apenas por entendimento, o valor % Fantasma W no Tantaló (5.33%) é uma estimativa feita graficamente no Virtual WDS.

A coluna M (Delta) é a diferença entre o valor medido de W e o valor estimado para o fantasma. Valores positivos “podem” indicar a presença de W real ou apenas mostram a imperfeita adequação do % estimado. De qualquer maneira, como se observa, seria muito pequena a sua contribuição.

As análises 9 e 41 podem/devem ser retiradas por “errôneas”. Isso certamente melhorará a média do total.

Tabela III.4 – Resultados das análises realizadas por microsonda eletrônica em Nb-tantalatos (13/03/2014). Pegmatitos: Am1, Neves; Am3, Ipê; Am6, Am7 e Am8, Cachoeira. Os grãos 1 a 4 da Am6, 1 a 5 da Am7 e 1 a 4 da Am8 são as análises 12 a 24, nesta ordem, das tabelas 4.1 e 1.

Group : Geologia_Mario											%Fantasma no tantalato=5,33 (Estimado graficamente)		
Sample : MC130314-NbTa													
Weight percent													
No.	Ta ₂ O ₅	MnO	SnO ₂	FeO	UO ₂	TiO ₂	Nb ₂ O ₅	WO ₃	Total	Comment	W Fan- tasma	Delta	Total – W _{fantasma}
1	16,42	3,15	0,80	16,28	0,00	1,22	61,29	1,00	100,16	Am1-G1-1	0,88	0,12	99,28
2	16,94	3,34	0,85	16,05	0,03	1,28	61,22	1,24	100,95	Am1-G1-2	0,90	0,33	100,04
3	16,65	3,31	0,93	16,38	0,00	1,18	61,36	1,21	101,03	Am1-G1-3	0,89	0,32	100,14
4	16,58	3,11	0,77	16,05	0,04	1,30	61,57	1,44	100,85	Am1-G1-4	0,88	0,56	99,96
5	16,88	3,09	0,86	16,06	0,03	1,29	61,61	1,43	101,25	Am1-G1-5	0,90	0,53	100,35
6	16,58	3,31	0,89	16,53	0,04	1,17	60,75	1,60	100,85	Am1-G2-1	0,88	0,71	99,97
7	17,19	2,92	0,88	16,45	0,00	1,19	60,47	1,36	100,45	Am1-G2-1	0,92	0,44	99,53
8	17,17	2,97	0,82	15,41	0,05	1,28	60,10	1,51	99,30	Am1-G2-3	0,91	0,59	98,39
9	17,12	3,25	0,82	15,70	0,07	1,17	59,77	1,78	99,67	Am1-G2-4	0,91	0,87	98,76
10	17,02	3,43	0,72	15,98	0,00	1,05	61,06	1,31	100,56	Am1-G2-5	0,91	0,40	99,66
11	62,94	13,74	0,36	2,93	0,01	0,51	19,75	3,04	103,28	Am1-G3-1	3,35	-0,31	99,93
12	62,23	13,55	0,28	2,97	0,02	0,71	19,55	3,18	102,50	Am1-G3-2	3,32	-0,13	99,18
13	60,87	13,59	0,47	3,25	0,10	0,52	19,85	2,92	101,57	Am1-G3-3	3,24	-0,33	98,32
14	62,62	13,55	0,38	2,85	0,00	0,61	18,02	3,61	101,63	Am1-G3-4	3,34	0,27	98,30
15	61,76	13,11	0,44	3,17	0,10	0,67	19,25	3,17	101,67	Am1-G3-5	3,29	-0,12	98,38
16	16,66	3,29	0,78	16,08	0,11	1,34	62,09	1,16	101,50	Am1-G4-1	0,89	0,27	100,61
17	16,10	3,37	0,83	16,19	0,00	1,07	62,36	1,04	100,96	Am1-G4-2	0,86	0,18	100,10
18	17,55	3,34	0,74	16,93	0,15	1,18	62,17	1,11	103,17	Am1-G4-3	0,94	0,18	102,23
19	16,58	3,25	0,66	16,27	0,06	0,87	61,16	0,90	99,74	Am1-G4-4	0,88	0,02	98,86
20	16,78	3,27	0,76	16,16	0,02	1,14	61,10	0,78	100,00	Am1-G4-5	0,89	-0,11	99,11
21	16,52	3,45	0,68	16,05	0,09	1,09	62,65	0,94	101,46	Am1-G5-1	0,88	0,06	100,58
22	16,15	3,24	0,70	15,81	0,08	1,05	62,27	1,13	100,43	Am1-G5-2	0,86	0,27	99,57
23	16,59	3,16	0,78	17,26	0,05	1,22	62,17	1,32	102,53	Am1-G5-3	0,88	0,43	101,65
24	16,44	3,44	0,63	17,14	0,08	1,20	61,72	1,13	101,77	Am1-G5-4	0,88	0,25	100,90
25	16,72	3,81	0,72	17,60	0,01	0,99	61,16	0,83	101,84	Am1-G5-5	0,89	-0,06	100,95
26	0,00	0,05	0,04	6,29	0,02	0,03	0,00	0,00	6,43	Am2-G1-1			
27	0,00	0,04	0,00	6,47	0,00	0,03	0,00	0,18	6,73	Am2-G1-2			
28	0,15	0,01	0,00	6,41	0,00	0,03	0,00	0,00	6,60	Am2-G1-3			
29	0,00	0,09	0,04	6,68	0,00	0,06	0,00	0,06	6,93	Am2-G1-4			
30	0,00	0,12	0,00	6,95	0,00	0,03	0,00	0,00	7,10	Am2-G1-5			
31	0,05	0,01	0,03	6,76	0,00	0,00	0,00	0,05	6,90	Am2-G2-1			
32	0,00	0,03	0,00	6,97	0,00	0,03	0,00	0,00	7,02	Am2-G2-2			
33	0,04	0,04	0,05	6,42	0,00	0,00	0,00	0,13	6,68	Am2-G2-3			
34	0,02	0,09	0,01	6,74	0,00	0,02	0,00	0,22	7,09	Am2-G2-4			
35	0,00	0,01	0,01	6,54	0,00	0,00	0,00	0,00	6,56	Am2-G2-5			
36	0,02	0,00	0,00	6,96	0,01	0,00	0,00	0,09	7,09	Am2-G3-1			
37	0,07	0,12	0,02	7,40	0,00	0,00	0,00	0,00	7,60	Am2-G3-2			
38	0,00	0,00	0,04	7,45	0,00	0,03	0,00	0,00	7,51	Am2-G3-3			
39	0,00	0,01	0,08	7,34	0,00	0,06	0,00	0,08	7,56	Am2-G3-4			
40	0,05	0,00	0,00	7,24	0,00	0,00	0,00	0,14	7,43	Am2-G3-5			
41	0,03	0,00	0,00	7,29	0,00	0,01	0,00	0,26	7,59	Am2-G4-1			
42	0,00	0,07	0,00	7,35	0,00	0,00	0,00	0,08	7,49	Am2-G4-2			
43	0,00	0,02	0,02	7,25	0,00	0,00	0,00	0,05	7,34	Am2-G4-3			
44	0,00	0,10	0,02	7,16	0,00	0,04	0,00	0,19	7,52	Am2-G4-4			
45	0,00	0,16	0,06	7,22	0,00	0,03	0,00	0,00	7,47	Am2-G4-5			
46	0,00	0,10	0,00	6,76	0,00	0,03	0,00	0,00	6,90	Am2-G5-1			
47	0,11	0,04	0,00	6,99	0,00	0,00	0,00	0,09	7,24	Am2-G5-2			
48	0,09	0,00	0,00	6,81	0,00	0,00	0,00	0,00	6,90	Am2-G5-3			
49	0,01	0,10	0,02	7,12	0,00	0,00	0,00	0,00	7,24	Am2-G5-4			
50	0,03	0,10	0,00	6,90	0,00	0,00	0,00	0,03	7,05	Am2-G5-5			
51	0,06	0,03	0,01	7,41	0,00	0,07	0,00	0,00	7,58	Am2-G6-1			

52	0,01	0,10	0,00	7,66	0,00	0,00	0,00	0,00	7,77	Am2-G6-2			
53	0,00	0,19	0,00	7,36	0,00	0,00	0,00	0,28	7,84	Am2-G6-3			
54	0,08	0,00	0,00	7,58	0,00	0,00	0,05	0,08	7,79	Am2-G6-4			
55	0,06	0,04	0,00	7,70	0,00	0,00	0,00	0,00	7,80	Am2-G6-5			
56	18,42	4,99	0,25	16,82	0,00	1,66	59,71	1,59	103,43	Am3-G1-1	0,98	0,61	102,45
57	17,99	4,97	0,22	16,90	0,00	1,69	58,78	1,40	101,94	Am3-G1-2	0,96	0,44	100,98
58	17,96	4,64	0,30	16,67	0,03	1,50	58,83	1,47	101,40	Am3-G1-3	0,96	0,51	100,44
59	17,47	4,55	0,14	16,24	0,13	1,64	58,25	1,66	100,07	Am3-G1-4	0,93	0,73	99,14
60	18,03	4,69	0,31	16,78	0,00	1,53	59,54	1,53	102,42	Am3-G1-5	0,96	0,57	101,46
61	18,17	4,77	0,24	16,30	0,00	1,55	59,49	1,74	102,27	Am3-G2-1	0,97	0,78	101,31
62	18,20	4,47	0,23	16,66	0,04	1,44	58,66	1,51	101,21	Am3-G2-2	0,97	0,54	100,24
63	18,12	4,57	0,22	16,73	0,00	1,53	58,17	1,69	101,02	Am3-G2-3	0,97	0,72	100,05
64	17,81	4,69	0,23	16,08	0,08	1,64	59,36	1,51	101,39	Am3-G2-4	0,95	0,56	100,44
65	18,24	4,91	0,27	16,45	0,11	1,63	58,51	1,27	101,39	Am3-G2-5	0,97	0,29	100,41
66	17,46	4,67	0,26	16,74	0,07	1,55	58,66	1,66	101,06	Am3-G3-1	0,93	0,73	100,13
67	18,08	4,56	0,18	17,09	0,02	1,57	59,41	1,37	102,29	Am3-G3-2	0,96	0,41	101,32
68	17,77	4,47	0,24	16,23	0,09	1,41	58,93	1,66	100,81	Am3-G3-3	0,95	0,71	99,86
69	18,18	4,57	0,21	17,25	0,05	1,68	59,31	1,31	102,54	Am3-G3-4	0,97	0,34	101,57
70	17,84	4,55	0,23	16,48	0,00	1,62	59,77	1,84	102,31	Am3-G3-5	0,95	0,88	101,36
71	17,86	4,76	0,27	16,45	0,00	1,60	60,03	1,69	102,66	Am3-G4-1	0,95	0,74	101,71
72	17,77	4,92	0,23	16,09	0,07	1,43	58,54	1,68	100,73	Am3-G4-2	0,95	0,74	99,78
73	18,14	4,55	0,22	16,82	0,00	1,57	58,82	1,66	101,78	Am3-G4-3	0,97	0,69	100,81
74	17,66	4,68	0,30	16,29	0,03	1,62	59,87	1,47	101,93	Am3-G4-4	0,94	0,53	100,98
75	18,22	4,86	0,20	16,37	0,11	1,45	58,70	1,64	101,55	Am3-G4-5	0,97	0,66	100,58
76	17,89	4,73	0,27	17,07	0,01	1,47	58,00	1,13	100,57	Am3-G5-1	0,95	0,18	99,61
77	18,06	4,46	0,27	17,53	0,00	1,49	58,46	1,57	101,83	Am3-G5-2	0,96	0,60	100,86
78	18,45	4,48	0,18	16,75	0,00	1,66	58,39	1,64	101,55	Am3-G5-3	0,98	0,65	100,56
79	17,75	4,80	0,20	16,22	0,10	1,55	58,18	1,68	100,47	Am3-G5-4	0,95	0,74	99,52
80	18,28	4,76	0,33	17,01	0,00	1,52	59,27	1,76	102,93	Am3-G5-5	0,97	0,79	101,96
81	0,00	0,16	0,00	7,34	0,00	0,00	0,00	0,00	7,50	Am4-G1-1			
82	0,07	0,14	0,02	7,47	0,00	0,03	0,00	0,13	7,85	Am4-G1-2			
83	0,00	0,02	0,00	7,49	0,00	0,03	0,00	0,04	7,57	Am4-G1-3			
84	0,08	0,17	0,00	7,28	0,00	0,00	0,00	0,00	7,53	Am4-G1-4			
85	0,01	0,14	0,00	7,13	0,02	0,09	0,00	0,00	7,39	Am4-G1-5			
86	0,00	0,13	0,10	7,27	0,06	0,05	0,00	0,00	7,59	Am4-G2-1			
87	0,03	0,17	0,00	6,83	0,00	0,00	0,00	0,09	7,12	Am4-G2-2			
88	0,00	0,15	0,00	7,34	0,03	0,00	0,00	0,00	7,52	Am4-G2-3			
89	0,01	0,09	0,08	7,08	0,05	0,00	0,00	0,01	7,33	Am4-G2-4			
90	0,00	0,21	0,01	7,00	0,00	0,02	0,00	0,03	7,27	Am4-G2-5			
91	0,00	0,11	0,04	7,07	0,00	0,00	0,00	0,00	7,21	Am4-G3-1			
92	0,07	0,20	0,00	6,70	0,02	0,00	0,00	0,21	7,20	Am4-G3-2			
93	0,00	0,15	0,00	6,72	0,00	0,05	0,00	0,17	7,08	Am4-G3-3			
94	0,01	0,12	0,01	6,63	0,06	0,00	0,00	0,00	6,83	Am4-G3-4			
95	0,00	0,19	0,08	6,88	0,00	0,00	0,00	0,00	7,16	Am4-G3-5			
96	0,00	0,13	0,00	6,58	0,00	0,07	0,00	0,19	6,96	Am4-G4-1			
97	0,00	0,05	0,01	6,95	0,00	0,06	0,00	0,00	7,07	Am4-G4-2			
98	0,03	0,00	0,00	6,98	0,05	0,00	0,00	0,00	7,06	Am4-G4-3			
99	0,01	0,08	0,00	6,84	0,00	0,10	0,00	0,00	7,03	Am4-G4-4			
100	0,04	0,10	0,00	6,74	0,00	0,00	0,00	0,00	6,89	Am4-G4-5			
101	0,06	0,10	0,00	7,31	0,00	0,00	0,00	0,08	7,55	Am4-G5-1			
102	0,00	0,18	0,00	6,99	0,00	0,00	0,00	0,00	7,17	Am4-G5-2			
103	0,00	0,11	0,00	7,07	0,00	0,00	0,00	0,21	7,39	Am4-G5-3			
104	0,00	0,15	0,00	6,97	0,00	0,00	0,00	0,05	7,17	Am4-G5-4			
105	0,01	0,08	0,00	6,88	0,01	0,00	0,00	0,04	7,01	Am4-G5-5			
106	6,80	0,02	101,50	1,46	0,06	0,53	0,59	0,48	111,45	Am5-G1-1	0,36	0,12	111,08
107	7,28	0,05	101,22	1,48	0,05	0,58	0,73	0,28	111,67	Am5-G1-2	0,39	-0,11	111,28
108	7,56	0,00	100,20	1,60	0,00	0,62	0,86	0,28	111,12	Am5-G1-3	0,40	-0,13	110,71
109	5,83	0,05	102,10	1,33	0,03	0,54	0,56	0,43	110,86	Am5-G1-4	0,31	0,12	110,55
110	7,04	0,00	102,03	1,44	0,00	0,79	0,82	0,25	112,37	Am5-G1-5	0,38	-0,12	111,99
111	6,00	0,02	102,74	1,32	0,07	0,66	0,58	0,02	111,41	Am5-G2-1	0,32	-0,30	111,09
112	6,99	0,06	101,11	1,47	0,03	0,64	0,62	0,31	111,23	Am5-G2-2	0,37	-0,06	110,86
113	7,02	0,00	101,75	1,52	0,00	0,64	0,86	0,64	112,43	Am5-G2-3	0,37	0,26	112,05
114	6,69	0,17	102,43	1,36	0,06	0,63	0,76	0,73	112,83	Am5-G2-4	0,36	0,38	112,47

115	7,12	0,00	101,77	1,56	0,00	0,54	0,82	0,21	112,01	Am5-G2-5	0,38	-0,17	111,63
116	7,33	0,07	100,91	1,64	0,04	0,54	0,84	0,34	111,70	Am5-G3-1	0,39	-0,05	111,31
117	7,19	0,00	101,22	1,74	0,08	0,49	0,67	0,35	111,73	Am5-G3-2	0,38	-0,03	111,35
118	6,81	0,14	101,49	1,62	0,00	0,74	0,70	0,40	111,90	Am5-G3-3	0,36	0,04	111,53
119	6,05	0,03	103,96	1,07	0,07	0,55	0,55	0,14	112,42	Am5-G3-4	0,32	-0,18	112,10
120	7,04	0,01	101,24	1,70	0,00	0,50	0,74	0,12	111,35	Am5-G3-5	0,38	-0,25	110,97
121	6,72	0,06	99,87	1,67	0,00	0,56	0,74	0,36	109,99	Am5-G4-1	0,36	0,00	109,63
122	6,94	0,07	102,08	1,59	0,13	0,47	0,67	0,45	112,39	Am5-G4-2	0,37	0,08	112,02
123	1,66	0,00	109,75	0,22	0,00	0,23	0,15	0,06	112,06	Am5-G4-3	0,09	-0,03	111,98
124	6,23	0,03	102,56	1,38	0,08	0,56	0,65	0,29	111,78	Am5-G4-4	0,33	-0,04	111,45
125	7,08	0,10	101,84	1,55	0,00	0,75	0,89	0,56	112,77	Am5-G4-5	0,38	0,18	112,39
126	6,50	0,11	102,96	1,27	0,00	0,57	0,57	0,18	112,16	Am5-G5-1	0,35	-0,17	111,81
127	7,19	0,11	102,02	1,36	0,01	0,66	0,82	0,35	112,52	Am5-G5-2	0,38	-0,03	112,14
128	6,89	0,09	101,10	1,35	0,00	0,71	0,65	0,56	111,33	Am5-G5-3	0,37	0,19	110,96
129	7,14	0,00	101,31	1,45	0,07	0,58	0,92	0,45	111,91	Am5-G5-4	0,38	0,07	111,53
130	1,90	0,10	110,18	0,31	0,08	0,38	0,16	0,00	113,11	Am5-G5-5	0,10	-0,10	113,00
131	64,50	6,63	15,18	6,80	0,01	1,01	6,97	2,99	104,09	Am6-G1-1	3,44	-0,45	100,65
132	61,75	5,99	14,10	7,94	0,09	1,14	9,64	2,86	103,51	Am6-G1-2	3,29	-0,43	100,22
133	58,38	6,32	15,57	7,66	0,11	0,62	10,84	3,45	102,94	Am6-G1-3	3,11	0,34	99,83
134	59,04	6,28	15,42	7,99	0,11	0,98	10,44	2,71	102,98	Am6-G1-4	3,15	-0,44	99,84
135	62,73	5,57	13,01	7,60	0,02	1,48	9,42	3,08	102,92	Am6-G1-5	3,34	-0,26	99,57
136	56,72	5,85	15,09	8,23	0,04	0,58	13,04	2,84	102,38	Am6-G2-1	3,02	-0,18	99,35
137	58,33	6,05	15,69	8,00	0,05	0,47	11,10	3,32	102,99	Am6-G2-2	3,11	0,21	99,88
138	59,56	6,05	16,21	7,72	0,00	0,66	10,45	2,91	103,55	Am6-G2-3	3,17	-0,26	100,38
139	57,52	5,74	16,58	7,69	0,07	0,64	10,52	2,78	101,54	Am6-G2-4	3,07	-0,29	98,47
140	58,72	6,23	15,59	7,50	0,00	0,48	11,15	2,83	102,50	Am6-G2-5	3,13	-0,30	99,37
141	34,69	6,35	0,57	12,78	0,00	1,19	43,72	1,94	101,24	Am6-G3-1	1,85	0,09	99,39
142	30,30	6,84	0,59	13,19	0,02	1,08	48,68	1,11	101,80	Am6-G3-2	1,61	-0,51	100,18
143	36,02	6,59	1,18	12,47	0,00	1,61	41,83	1,80	101,49	Am6-G3-3	1,92	-0,12	99,57
144	29,18	6,36	0,56	13,12	0,06	1,03	49,43	1,60	101,34	Am6-G3-4	1,56	0,04	99,79
145	29,72	6,45	0,57	13,82	0,02	1,09	50,25	1,70	103,62	Am6-G3-5	1,58	0,12	102,03
146	33,66	7,19	0,55	12,49	0,11	1,02	44,45	1,74	101,20	Am6-G4-1	1,79	-0,06	99,41
147	35,87	7,83	0,22	11,12	0,00	0,58	44,15	1,70	101,47	Am6-G4-2	1,91	-0,22	99,56
148	35,87	7,15	0,10	11,40	0,00	0,46	45,15	2,01	102,12	Am6-G4-3	1,91	0,09	100,21
149	50,61	6,56	1,41	10,98	0,13	2,16	25,77	2,62	100,24	Am6-G4-4	2,70	-0,08	97,54
150	50,99	6,29	1,36	10,97	0,02	2,15	25,65	2,83	100,27	Am6-G4-5	2,72	0,11	97,55
151	51,04	4,77	1,10	12,18	0,05	2,00	27,85	2,36	101,34	Am7-G1-1	2,72	-0,36	98,62
152	50,22	5,05	2,50	12,01	0,08	2,19	27,76	2,55	102,35	Am7-G1-2	2,68	-0,13	99,68
153	49,91	5,13	1,49	11,74	0,10	2,77	27,77	2,56	101,46	Am7-G1-3	2,66	-0,10	98,80
154	51,38	4,75	1,11	11,95	0,06	1,89	28,51	2,76	102,41	Am7-G1-4	2,74	0,02	99,67
155	52,00	4,64	4,08	11,30	0,04	1,98	24,23	2,47	100,74	Am7-G1-5	2,77	-0,30	97,97
156	22,89	6,75	0,83	13,22	0,08	1,44	54,92	1,44	101,56	Am7-G2-1	1,22	0,22	100,34
157	56,59	4,37	14,42	8,77	0,11	2,98	12,46	2,73	102,43	Am7-G2-2	3,02	-0,29	99,41
158	60,61	5,85	11,03	7,39	0,00	3,55	10,15	3,54	102,12	Am7-G2-3	3,23	0,31	98,89
159	58,60	4,53	15,61	8,60	0,00	2,92	10,59	3,07	103,92	Am7-G2-4	3,12	-0,06	100,79
160	53,49	5,52	0,93	11,26	0,03	1,46	25,81	3,01	101,51	Am7-G2-5	2,85	0,15	98,66
161	57,00	6,19	0,87	10,69	0,00	1,22	23,22	2,82	102,00	Am7-G3-1	3,04	-0,22	98,96
162	55,74	4,39	14,89	8,83	0,00	2,90	12,11	2,71	101,58	Am7-G3-2	2,97	-0,26	98,61
163	59,38	5,30	15,39	7,93	0,00	1,78	9,78	3,25	102,81	Am7-G3-3	3,16	0,09	99,64
164	55,47	4,48	16,54	9,51	0,00	1,82	12,29	3,45	103,54	Am7-G3-4	2,96	0,49	100,59
165	60,11	5,65	11,83	8,92	0,08	1,77	11,43	3,03	102,82	Am7-G3-5	3,20	-0,18	99,62
166	47,84	5,01	2,03	11,52	0,02	1,70	26,75	2,38	97,25	Am7-G4-1	2,55	-0,17	94,69
167	50,59	5,41	1,24	12,03	0,08	1,82	28,00	3,02	102,18	Am7-G4-2	2,70	0,32	99,48
168	52,73	5,95	0,90	11,30	0,00	1,63	26,59	2,76	101,86	Am7-G4-3	2,81	-0,05	99,05
169	50,23	5,29	1,32	12,22	0,13	2,57	27,77	2,25	101,76	Am7-G4-4	2,68	-0,43	99,09
170	53,40	5,47	0,79	12,95	0,00	1,49	27,05	2,32	103,46	Am7-G4-5	2,85	-0,53	100,62
171	18,57	6,97	0,77	14,88	0,13	1,46	58,73	0,73	102,23	Am7-G5-1	0,99	-0,26	101,24
172	50,21	4,83	1,39	12,21	0,00	1,75	28,58	2,64	101,62	Am7-G5-2	2,68	-0,03	98,94
173	47,38	5,36	1,55	11,69	0,12	1,47	31,51	2,50	101,58	Am7-G5-3	2,53	-0,03	99,06
174	46,13	5,45	0,98	12,28	0,14	1,61	31,76	2,88	101,21	Am7-G5-4	2,46	0,42	98,75
175	54,14	5,45	1,43	11,17	0,01	1,92	24,68	2,45	101,24	Am7-G5-5	2,89	-0,43	98,35
176	57,27	6,07	0,71	10,97	0,08	1,24	23,45	2,83	102,62	Am8-G1-1	3,05	-0,22	99,56
177	58,69	4,37	15,46	8,84	0,07	2,36	10,13	2,87	102,78	Am8-G1-2	3,13	-0,26	99,65

178	56,68	6,11	0,50	10,90	0,07	1,09	24,06	3,01	102,40	Am8-G1-3	3,02	-0,01	99,38
179	57,63	4,43	15,17	8,84	0,00	3,02	11,42	2,96	103,45	Am8-G1-4	3,07	-0,11	100,38
180	55,24	4,06	14,61	9,49	0,10	3,17	13,69	2,86	103,22	Am8-G1-5	2,94	-0,08	100,28
181	52,87	4,59	15,35	9,14	0,02	1,30	14,43	2,87	100,58	Am8-G2-1	2,82	0,06	97,76
182	56,45	4,31	12,71	9,53	0,00	4,51	11,79	2,32	101,63	Am8-G2-2	3,01	-0,69	98,62
183	57,56	4,23	14,29	9,49	0,05	2,55	10,55	3,00	101,72	Am8-G2-3	3,07	-0,07	98,65
184	57,46	4,47	14,54	8,89	0,06	3,40	11,53	3,23	103,58	Am8-G2-4	3,06	0,17	100,52
185	57,43	4,76	14,30	9,02	0,03	3,15	11,08	2,74	102,52	Am8-G2-5	3,06	-0,32	99,46
186	58,90	5,75	11,85	8,36	0,16	1,30	12,98	3,14	102,44	Am8-G3-1	3,14	0,00	99,30
187	58,41	6,47	11,03	7,71	0,00	1,37	12,56	2,94	100,49	Am8-G3-2	3,11	-0,17	97,37
188	60,99	6,47	11,28	8,07	0,00	1,79	10,56	3,08	102,24	Am8-G3-3	3,25	-0,17	98,99
189	59,40	6,26	11,42	7,47	0,19	1,27	12,77	3,10	101,89	Am8-G3-4	3,17	-0,07	98,72
190	55,10	5,83	5,90	7,92	0,34	1,15	16,72	2,81	95,77	Am8-G3-5	2,94	-0,13	92,83
191	57,48	5,86	9,85	8,81	0,08	1,48	15,88	3,09	102,52	Am8-G4-1	3,06	0,03	99,46
192	57,11	6,17	12,34	8,40	0,02	1,33	13,30	2,86	101,53	Am8-G4-2	3,04	-0,19	98,48
193	59,05	6,03	11,41	8,44	0,16	1,27	13,89	3,02	103,27	Am8-G4-3	3,15	-0,12	100,12
194	51,55	3,68	7,87	5,45	1,06	1,53	16,21	2,47	89,82	Am8-G4-4	2,75	-0,27	87,07
195	56,67	6,02	11,36	8,14	0,12	1,22	13,02	3,41	99,96	Am8-G4-5	3,02	0,39	96,94

OBS: A amostra 2 é ZnS (esfalerita), confirmada por EDS. Tem um pouco de ferro. A amostra 4, com teor similar de ferro, possivelmente também é esfalerita
A amostra 5 é cassiterita.

ANEXO IV – Resultados completos das análises por ICP-OES/ICP-MS/AAS



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES

GQ1404556

Página 1 de 4

Solicitante:	FUNDACAO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA AV ANTONIO CARLOS 6627 UNID.ADM.II PAMPULHA 31270901 BELO HORIZONTE MG		
Attn.:	Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves		
Ref. Cliente:	Pedido 31/07/2014	Número de Amostras:	15
Produto:	SILICATOS	Data do Recebimento:	31-jul-2014
Projeto:	Default	Data de Envio:	05-set-2014
		Completado Em:	05-set-2014
Notas	Reportou-se a soma (SUM) como NA, pois o analito SiO2 apresentou-se acima do limite superior de análise.		
Referência Analítica	AAS41B Determinação por Digestão Multiácida - (acima de 5.000 ppm) - AAS ICP95A Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio - ICP OES IMS95A Determinação por Fusão com Metaborato de Lítio - ICP MS		
Legenda	L.D. = Limite de Detecção BLK = Branco REP = Replicata DUP = Duplicata L.N.R. = Listada Não Recebida I.S. = Amostra Insuficiente N.A. = Não Analisada STD = Padrão I.N.F. = Não reportados devido a interferentes OVR = Não Analisada devido ao alto teor		


Marcos Filipe Gonçalves Silva
CRQ II 02202046
Responsável Técnico



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ1404556

Página 2 de 4

Análises Método Unidade Limite Detecção	Al2O3	Ba	CaO	Cr2O3	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O
	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 10	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01
BRANCO_PREP	<0,01	<10	<0,01	<0,01	0,39	<0,01	<0,01	<0,01	0,01
5 - ESPCHAP	26,47	<10	<0,01	<0,01	2,76	0,01	<0,01	0,10	0,13
6 - ESPNEV	26,73	<10	<0,01	<0,01	1,82	<0,01	<0,01	0,05	0,11
7 - ESPSTAROSA	27,86	<10	<0,01	<0,01	1,39	0,02	<0,01	0,04	0,10
8 - ESPCACHIND	27,23	<10	<0,01	<0,01	1,76	<0,01	<0,01	0,09	0,16
9 - ESPCACH3	27,48	<10	<0,01	<0,01	1,63	<0,01	<0,01	0,07	0,14
10 - ESPPALMSTAROSA	30,02	<10	0,02	<0,01	0,73	0,16	0,02	0,03	0,06
11 - KUNZURUC	27,71	<10	<0,01	<0,01	1,25	<0,01	<0,01	0,08	0,11
12 - MICROCLSTAROSA	19,85	<10	0,07	<0,01	0,59	12,63	<0,01	<0,01	2,58
13 - MICROCLCHAP	18,26	53	0,02	<0,01	0,48	12,77	<0,01	<0,01	1,88
14 - MICROCLURUC	18,48	<10	0,03	<0,01	0,37	12,59	<0,01	<0,01	2,43
15 - MICROCLCACH	19,11	33	0,02	<0,01	0,41	13,34	<0,01	<0,01	2,31
16 - ALBURUC	19,85	<10	0,12	<0,01	0,63	0,28	<0,01	<0,01	11,40
17 - ALBSTAROSA	19,73	<10	0,08	<0,01	0,60	0,38	<0,01	<0,01	11,08
18 - ALBCACH	20,04	<10	0,15	<0,01	0,42	0,30	<0,01	<0,01	11,07
19 - ALBNEV	18,34	<10	0,08	<0,01	0,43	0,21	<0,01	<0,01	11,05
* REP 19 - ALBNEV	18,88	<10	0,08	<0,01	0,46	0,22	<0,01	<0,01	11,39
* STD TILL-3	12,16	447	2,43	0,02	3,63	2,23	1,61	0,06	2,63
Análises Método Unidade Limite Detecção	P2O5	SiO2	Sr	TiO2	Zn	Zr	LOI	Sum	V
	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 10	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 5	ICP95A PPM 10	ICP95A % 0,01	ICP95A % 0,01	ICP95A PPM 5
BRANCO_PREP	<0,01	>90,00	<10	<0,01	9	<10	0,07	N.A.	<5
5 - ESPCHAP	0,01	66,04	<10	0,48	17	17	<0,01	95,94	13
6 - ESPNEV	0,02	66,32	<10	0,02	<5	<10	0,14	95,21	38
7 - ESPSTAROSA	<0,01	67,22	<10	0,03	6	<10	0,24	96,90	12
8 - ESPCACHIND	<0,01	67,83	<10	0,02	16	<10	<0,01	97,03	19
9 - ESPCACH3	<0,01	68,14	<10	0,02	12	<10	<0,01	97,47	<5
10 - ESPPALMSTAROSA	0,02	62,94	<10	<0,01	10	<10	4,98	98,98	13
11 - KUNZURUC	<0,01	67,65	<10	0,28	<5	<10	<0,01	97,00	26
12 - MICROCLSTAROSA	0,74	65,88	15	<0,01	5	<10	0,57	102,93	5
13 - MICROCLCHAP	0,30	64,31	25	0,02	<5	<10	0,56	98,61	<5
14 - MICROCLURUC	0,11	66,20	<10	<0,01	9	<10	0,51	100,72	<5
15 - MICROCLCACH	0,30	66,37	55	<0,01	<5	<10	0,50	102,36	<5
16 - ALBURUC	0,08	69,21	<10	0,02	<5	<10	0,27	101,88	31
17 - ALBSTAROSA	0,14	68,67	<10	<0,01	<5	<10	0,35	101,04	18
18 - ALBCACH	0,40	68,70	18	<0,01	<5	<10	0,47	101,55	6
19 - ALBNEV	0,32	69,30	<10	<0,01	<5	<10	0,74	100,46	7
* REP 19 - ALBNEV	0,32	69,01	<10	<0,01	6	<10	0,74	101,12	<5
* STD TILL-3	0,11	70,48	286	0,42	54	202	N.A.	N.A.	47

Os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL Laboratórios Ltda. - Rodovia MG 010, Km 24,5 - Bairro Angicos - Vespasiano - MG - Brasil - CEP: 33.200-000
 Telefone +55 31 3045-0261 Fax +55 31 3045-0223 www.sgsgeosol.com.br
 Certificados ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004 (ABS 32982 e ABS 39911)

Os resultados expressos neste Certificado se referem somente ao material recebido. Proibida a reprodução parcial deste documento.



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ1404556

Página 3 de 4

Análises Método Unidade Limite Detecção	Ag	Ce	Co	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga
	IMS95A PPM 1	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,5	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 5	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1
BRANCO_PREP	INF	1,7	<0,5	<0,05	<5	0,18	0,08	<0,05	0,3
5 - ESPCHAP	INF	13,7	1,6	0,20	<5	2,63	1,55	0,28	77,8
6 - ESPNEV	INF	1,8	0,7	<0,05	<5	0,23	0,10	<0,05	61,0
7 - ESPSTAROSA	INF	1,7	0,5	5,85	<5	0,27	0,14	<0,05	65,5
8 - ESPCACHIND	INF	2,0	0,5	2,09	<5	0,15	0,07	<0,05	70,3
9 - ESPCACH3	INF	1,6	<0,5	0,45	<5	0,17	0,09	<0,05	78,5
10 - ESPPALMSTAROSA	INF	1,4	<0,5	51,28	<5	0,17	0,08	<0,05	78,8
11 - KUNZURUC	INF	3,0	0,8	0,15	<5	0,50	0,29	0,05	82,7
12 - MICROCLSTAROSA	INF	1,5	<0,5	119,39	<5	0,12	<0,05	<0,05	15,8
13 - MICROCLCHAP	INF	2,3	<0,5	229,66	<5	0,33	0,15	0,08	15,0
14 - MICROCLURUC	INF	1,0	<0,5	214,52	<5	0,17	0,06	<0,05	11,6
15 - MICROCLCACH	INF	0,8	<0,5	144,21	<5	0,08	<0,05	<0,05	17,8
16 - ALBURUC	INF	1,4	<0,5	8,92	<5	0,13	0,09	<0,05	24,1
17 - ALBSTAROSA	INF	1,3	<0,5	4,63	<5	0,16	0,09	<0,05	23,7
18 - ALBCACH	INF	0,8	<0,5	8,13	<5	0,07	<0,05	<0,05	24,9
19 - ALBNEV	INF	2,0	0,5	6,53	<5	0,23	0,14	0,08	21,2
* REP 19 - ALBNEV	INF	1,9	0,6	6,68	<5	0,19	0,12	0,07	22,1
* STD TILL-3	INF	37,8	12,5	1,41	17	1,98	1,15	0,61	10,4
Análises Método Unidade Limite Detecção	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni
	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 2	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 5
BRANCO_PREP	0,27	<0,05	<0,05	4,0	<0,05	<2	0,12	0,1	<5
5 - ESPCHAP	1,91	0,74	0,60	11,1	0,12	<2	5,27	7,5	7
6 - ESPNEV	0,30	0,16	<0,05	4,4	<0,05	<2	0,67	2,3	<5
7 - ESPSTAROSA	0,36	0,66	0,05	4,3	<0,05	<2	0,80	2,2	<5
8 - ESPCACHIND	0,21	0,26	<0,05	4,9	<0,05	<2	0,81	1,7	<5
9 - ESPCACH3	0,21	0,71	<0,05	2,8	<0,05	<2	10,77	1,1	<5
10 - ESPPALMSTAROSA	0,18	0,40	<0,05	4,7	<0,05	<2	3,30	1,7	<5
11 - KUNZURUC	0,54	0,39	0,10	7,9	<0,05	<2	2,73	3,1	6
12 - MICROCLSTAROSA	0,16	<0,05	<0,05	2,8	<0,05	<2	0,64	1,4	<5
13 - MICROCLCHAP	0,48	<0,05	0,05	5,8	<0,05	<2	2,03	3,2	<5
14 - MICROCLURUC	0,25	<0,05	<0,05	3,4	<0,05	<2	0,16	1,8	<5
15 - MICROCLCACH	0,13	<0,05	<0,05	2,3	<0,05	<2	0,37	1,2	<5
16 - ALBURUC	0,17	0,16	<0,05	4,0	<0,05	<2	1,11	1,3	<5
17 - ALBSTAROSA	0,22	<0,05	<0,05	4,6	<0,05	<2	0,18	1,7	<5
18 - ALBCACH	0,11	0,10	<0,05	2,2	<0,05	<2	3,41	0,8	<5
19 - ALBNEV	0,34	0,14	<0,05	5,3	<0,05	<2	11,63	2,9	<5
* REP 19 - ALBNEV	0,32	0,13	<0,05	5,2	<0,05	<2	12,64	3,0	<5
* STD TILL-3	2,35	7,98	0,41	19,1	0,15	<2	6,26	15,1	32



SGS GEOSOL LABORATÓRIOS LTDA.

CERTIFICADO DE ANÁLISES
GQ1404556

Página 4 de 4

Análises Método Unidade Limite Detecção	Pr	Rb	Sm	Sn	Ta	Tb	Th	Tl	Tm
	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,2	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,3	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,5	IMS95A PPM 0,05
BRANCO_PREP	0,63	<0,2	0,3	<0,3	<0,05	<0,05	0,4	<0,5	<0,05
5 - ESPCHAP	2,11	1,4	1,2	56,4	0,31	0,38	0,7	<0,5	0,21
6 - ESPNEV	0,72	<0,2	0,3	137,1	<0,05	<0,05	0,2	<0,5	<0,05
7 - ESPSTAROSA	0,65	2,2	0,3	287,0	2,05	0,07	0,4	<0,5	<0,05
8 - ESPCACHIND	0,51	1,5	0,2	65,0	0,17	<0,05	0,2	<0,5	<0,05
9 - ESPCACH3	0,37	0,3	0,2	43,0	<0,05	<0,05	1,2	<0,5	<0,05
10 - ESPPALMSTAROSA	0,52	62,3	0,2	475,7	3,92	<0,05	0,3	<0,5	<0,05
11 - KUNZURUC	0,92	0,3	0,5	72,1	<0,05	0,08	0,2	<0,5	<0,05
12 - MICROCLSTAROSA	0,45	1743,1	0,2	20,0	<0,05	<0,05	<0,1	5,5	<0,05
13 - MICROCLCHAP	1,02	1885,0	0,5	14,9	2,04	0,07	<0,1	11,2	<0,05
14 - MICROCLURUC	0,55	907,2	0,3	5,6	<0,05	<0,05	<0,1	4,0	<0,05
15 - MICROCLCACH	0,31	2429,4	0,1	6,8	<0,05	<0,05	<0,1	10,8	<0,05
16 - ALBURUC	0,38	38,7	0,2	5,8	11,79	<0,05	<0,1	1,1	<0,05
17 - ALBSTAROSA	0,53	19,9	0,2	0,9	<0,05	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05
18 - ALBCACH	0,24	59,5	<0,1	15,4	5,96	<0,05	0,4	<0,5	<0,05
19 - ALBNEV	0,83	28,5	0,4	100,9	16,11	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05
* REP 19 - ALBNEV	0,95	29,4	0,4	99,0	16,71	<0,05	<0,1	<0,5	<0,05
* STD TILL-3	3,90	50,0	2,8	1,7	0,27	0,39	3,9	<0,5	0,17

Análises Método Unidade Limite Detecção	U	W	Y	Yb	Li
	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	IMS95A PPM 0,05	IMS95A PPM 0,1	AAS41B % 0,01
BRANCO_PREP	<0,05	0,2	1,06	<0,1	<0,01
5 - ESPCHAP	0,20	0,4	15,14	1,0	>5,00
6 - ESPNEV	0,09	0,3	1,25	<0,1	>5,00
7 - ESPSTAROSA	<0,05	0,3	1,72	0,1	4,92
8 - ESPCACHIND	0,13	2,8	0,90	<0,1	>5,00
9 - ESPCACH3	<0,05	<0,1	0,93	<0,1	>5,00
10 - ESPPALMSTAROSA	0,22	0,8	0,88	<0,1	3,39
11 - KUNZURUC	0,06	0,4	2,93	0,2	4,94
12 - MICROCLSTAROSA	1,00	0,5	0,68	<0,1	0,08
13 - MICROCLCHAP	<0,05	0,7	1,82	0,1	0,07
14 - MICROCLURUC	0,14	0,2	0,94	<0,1	0,03
15 - MICROCLCACH	<0,05	0,9	0,63	<0,1	0,09
16 - ALBURUC	0,18	0,7	0,83	<0,1	0,01
17 - ALBSTAROSA	0,09	0,2	1,01	<0,1	<0,01
18 - ALBCACH	1,06	0,3	0,45	<0,1	0,02
19 - ALBNEV	0,32	0,3	1,03	<0,1	0,01
* REP 7 - ESPSTAROSA					4,98
* STD GBM998-4					<0,01
* REP 19 - ALBNEV	0,34	0,4	0,98	<0,1	
* STD TILL-3	1,77	0,9	16,19	1,1	