UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**O DISTRITO PEGMATÍTICO DE SANTA MARIA DE
ITABIRA, MG.
MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E ZONEOGRAFIA.**

VITÓRIA RÉGIA PÉRES DA ROCHA OLIVEIROS MARCIANO.

ORIENTADOR: PROF. DR. DARCY PEDRO SVISERO.

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005171

**O DISTRITO PEGMATÍTICO DE SANTA MARIA DE
ITABIRA, MG.
MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E ZONEOGRAFIA**

VITÓRIA RÉGIA PÉRES DA ROCHA OLIVEIROS MARCIANO

ORIENTADOR: PROF. DR. DARCY PEDRO SVISERO

TESE DE DOUTORADO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO

1995

14. PEGMATITO DA PONTE DA RAÍZ EM SANTA MARIA DE ITABIRA.

INDICE GERAL

INDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE TABELAS	vi
INDICE DE FOTOGRAFIAS	viii
INDICE DE MICROGRAFIAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
AGRADECIMENTOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
2. HISTÓRICO E EVPLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS	5
2.1. A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL	5
2.2. O DISTRITO DE SANTA MARIA DO ITABIRA	11
3. ASPECTOS FISIOGRAFICOS DA ÁREA	12
3.1. HIDROGRAFIA	12
3.2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	12
3.3. CLIMA	14
3.4. VEGETAÇÃO	16
3.5. SOLO	16
4. MÉTODOS ANALÍTICOS	18
4.1. ATIVIDADES DE CAMPO	18
4.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	20
4.3. ANÁLISES QUÍMICAS POR VIA HÚMIDA	20
4.4. MÉTODOS INSTRUMENTAIS	20
4.4.1. MÉTODOS ÓPTICOS	21
4.4.2. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	21
4.4.3. ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRATERMELHO	21
4.4.4. ESPECTROSCOPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	21
4.4.5. ESPECTROSCOPIA MICRO RAMAN	22
4.4.6. ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER	22
4.4.7. PLASMA INDUZIDO (ICP)	22
4.4.8. FOTOMETRIA DE CHAMA	22
4.4.9. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	23
4.4.10. MICROSSONDA ELETRÔNICA	23
4.4.11. ESPECTROMOETRIA DE MASSA	23
5. AS ROCHAS ENCAIXANTES	24
5.1. ASPECTOS MACROSCÓPICOS	25
5.2. ASPECTOS MICROSCÓPICOS	27
5.3. ANÁLISE MINERALÓGICA	36
5.3.1. ANÁLISE POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	37

5.3.2. ANÁLISE POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO	37
5.4. GEOQUÍMICA	39
5.4.1. ELEMENTOS MAIORES	39
5.4.2. ELEMENTOS MENORES E TRAÇOS	41
5.4.3. DIAGRAMAS DE CARACTERIZAÇÃO DE AMBIÊNCIA GEOTECTÔNICA	49
5.5. CONCLUSÕES	56
6. PEGMATITOS	57
6.1. CADASTRAMENTO	57
6.2. RELAÇÕES DE CONTATO ENTRE OS PEGMATITOS E EOS GNAISSES	65
6.3. DIMENSÃO E FORMA	74
6.4. ESTRUTURA INTERNA	74
6.4.1. PEGMATITOS SIMPLES	77
6.4.2. PEGMATITOS ZONADOS SIMPLES	77
6.4.2.1. ZONA MARGINAL	77
6.4.2.2. ZONA MURAL OU GRÁFICA	77
6.4.2.3. ZONA INTERMÉDIA	78
6.4.2.4. NÚCLEO	78
6.4.2.5. CORPOS DE SUBSTITUIÇÃO	79
6.5. CONCLUSÕES	79
7. GEOCROLOGIA	81
7.1. DADOS GEOCROLÓGICOS DE PEGMATITOS DA PPO	82
7.2. ESCOLHA DA FASE MINERAL DATADA	82
7.3. DADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO	85
7.4. DADOS GEOCROLÓGICOS DAS ROCHAS GRANITO-GNAISSICAS	86
7.5. DISCUSSÃO DOS DADOS	89
7.6. CONCLUSÕES	91
8. FELDSPATOS	93
8.1. ASPECTOS MORFOLÓGICOS	93
8.2. ASPECTOS MICROSCÓPICOS	94
8.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	95
8.4. ESTUDO POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO	97
8.5. QUIMISMO DOS FELDSPATOS	97
8.5.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MICROCLINA PERTÍTICA	100
8.5.1.1. COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS TRAÇOS	100
8.5.1.2. COMPORTAMENTO DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR)	115
8.5.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA ALBITA	116
8.6. CONCLUSÕES	119
9. MICAS	121
9.1. ESTRUTURA DAS MICAS	121
9.2. ASPECTOS MORFOLÓGICOS	124
9.3. ESTUDOS POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	125
9.4. ESTUDOS POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO	126
9.5. QUIMISMO DAS MICAS	127
9.5.1. OS ELEMENTOS TERRAS RARAS	140
9.5.2. CARACTERIZAÇÃO MÖSBAUER DE BIOTITA	140
9.6. CONCLUSÕES	146
10. OS BERILOS	148

10.1. ASPECTOS MORFOLÓGICOS	148
10.2. ASPECTOS MICROSCÓPICOS	149
10.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	149
10.4. QUIMISMO DOS BERILOS	150
10.5. INCLUSÕES FLUIDAS DOS BERILOS	152
10.6. CONCLUSÕES	156
11. OS NIÓBIO TANTALATOS	157
11.1. CLASSIFICAÇÃO DOS NIÓBIO-TANTALATOS	157
11.2. ASPECTOS MACROSCÓPICOS	159
11.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	161
11.4. ASPECTOS MICROSCÓPICOS	161
11.5. DADOS OBTIDOS POR EDS	163
11.6. QUIMISMO DOS NIÓBIO-TANTALATOS	166
11.7. CONCLUSÕES	176
12. MONAZITA	177
12.1. A SÉRIE MONAZITA-HUTTONITA-SHERALITA	177
12.2. CARACTERÍSTICA MACROSCÓPICAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS	178
12.3. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	179
12.4. ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO	179
12.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	184
12.6. QUIMISMO DAS MONAZITAS E DAS FASES ASSOCIADAS	190
12.7. CONCLUSÕES	194
13. CONCLUSÕES FINAIS	196
13.1. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA	196
13.2. EVOLUÇÃO INTERNA DOS CORPOS PEGMATÍTICOS	197
13.3. ZONEOGRAFIA DOS CORPOS PEGMATÍTICOS ESTUDADOS	198
14. BIBLIOGRAFIA	201

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localização da área de pesquisa dentro da Província Pegmatítica Oriental.	2
Figura 2.2. Percursos aproximados das primeiras entradas e bandeiras.	6
Figura 2.3. Localização geográfica aproximada das principais regiões produtoras de gemas.	7
Figura 2.3. Principais jazidas brasileiras de água-marinha e turmalinas.	8
Figura 3.1. Relação dos municípios que compõem a área de pesquisa desta tese.	13
Figura 5.1. Mapa de localização das amostras de granitóides estudadas.	26
Figura 5.2. Diagrama de difração de raios X da fração leve dos granitóides estudados.	38
Figura 5.3. Diagrama de espectroscopia no infravermelho da fração leve dos granitóides.	40
Figura 5.4. Diagrama de Le Maitre (1989) para os granitóides.	44
Figura 5.5. Representação do índice de alcalinidade de Shand para os granitóides.	44
Figura 5.6. Diagrama de Middlemost (1985).	45
Figura 5.7. Diagrama de Debon & Le Fort (1983).	45
Figura 5.8. Diagrama de El Bouseily e Sokkory (1975).	48
Figura 5.9A. Aracnograma das amostras dos Gnaisses Guanhães.	50
Figura 5.9B. Aracnograma das amostras dos Granitos Borrachudos.	50
Figura 5.10. Diagrama de Batchelor & Bowden (1985).	51
Figura 5.11. Diagrama de Maniar & Piccoli (1989).	51
Figura 5.12. Diagrama de $\text{FeO}/(\text{FeO}^* + \text{MgO}) \times \text{SiO}_2$.	52
Figura 5.13. Diagrama de $\text{Log Nb} \times \text{Log Y}$.	52
Figura 5.14. Diagrama de $\text{Log Rb} \times \text{Log Y+Nb}$.	53
Figura 5.15. Diagrama dos ETR para os Gnaisses Guanhães.	54
Figura 5.16. Diagrama dos ETR para os Granitos Borrachudos.	54
Figura 5.17. Padrão de distribuição dos ETR nas duas suites graníticas.	55
Mapa 6.1. Localização dos corpos estudados	60
Mapa 6.2. Localização dos corpos estudados	64
Mapa 6.3. Localização dos corpos estudados	69
Mapa 6.4. Localização dos corpos estudados	72
Figura 7.1. Mapa síntese da localização das datações radiométricas em pegmatitos.	84
Figura 8.1. Aspectos da estrutura dos feldspatos.	94
Figura 8.3. Diagrama de espectroscopia de absorção no infravermelho de microclina.	98
Figura 8.4. Diagrama de espectroscopia de absorção no infravermelho de albita.	99
Figura 8.5. Diagrama triangular no sistema Ab-Or-An.	105
Figura 8.6. Relação $\text{Rb} \times \text{SiO}_2$ nos feldspatos.	110
Figura 8.7. Relação $\text{Ba} \times \text{SiO}_2$.	110
Figura 8.8. Relação $\text{Sr} \times \text{SiO}_2$.	111
Figura 8.9. Relação $\text{Pb} \times \text{SiO}_2$.	113
Figura 8.10. Relação $\text{Zr} \times \text{SiO}_2$.	113
Figura 8.11. Relação $\text{Y} \times \text{SiO}_2$.	114
Figura 8.12. Relação $\text{F} \times \text{SiO}_2$.	114
Figura 8.14. Padrão de distribuição de ETR nos feldspatos.	117
Figura 9.1. Aspectos da estrutura das micas.	122

Figura 9.2. Distribuição do Zr nas muscovita.	133
Figura 9.3. Relação K/Rb nas muscovita.	136
Figura 9.4. Relação K/Rb x Li nas muscovita.	137
Figura 9.5. Relação K/Ti x Ti nas muscovita.	137
Figura 9.6. Relação Li/ Rb nas muscovita.	138
Figura 9.7. Relação FeO/ Fe ₂ O ₃ nas muscovita.	139
Figura 9.8. Relação Ta x Cs nas muscovita.	141
Figura 9.9. ETR em muscovita.	143
Figura 9.10. ETR em biotita.	144
Figura 9.11. Diagrama de Espectroscopia Mössbauer de biotita.	145
Figura 10.1. Diagrama de Na/Li x Cs em berilo.	151
Figura 10.2. Diagramas relacionando os elementos alcalinos ao Be e SiO ₂ .	152
Figura 11.1. Relação a ₀ x c ₀ na columbita.	162
Figura 11.2. Diagrama Ta/Ta+Nb x Mn/Mn+Fe nos nióbio-tantalatos.	170
Figura 11.3. Relação Ti+Sn+W x Ta+Nb.	170
Figura 11.4. Relação Ti+Sn+W x Fe+Mn.	171
Figura 11.5. Relação Ti+W+Sn x Nb+Ta x Fe+Mn.	177
Figura 12.1. Espectros de absorção no infravermelho de monazita.	183
Figura 12.2. Diagrama EDS das substâncias encontradas em fratura de monazita.	186
Figura 12.3. Diagrama EDS de monazita microfaturada.	187
Figura 12.4. Relação Th x La nas monazita.	191
Figura 12.5. Relação Sm+Nd x Ca na monazita.	191
Figura 12.6. Relação entre os elementos ocupantes do sítio A na estrutura da monazita.	192
Figura 12.7. Relação Th x Si em monazita.	192

INDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais	10
Tabela 5.1 Dados relativos às análises modais de amostras dos Gnaisses Guanhães	31
Tabela 5.2 - Dados relativos às análises modais de amostras dos Granitos Borrachudos e do Gnaisse Bicas	32
Tabela 5.3 - Síntese sobre análises microscópicas publicadas de rochas granitóides das suites Guanhães, Borrachudos e Bicas.	33
Tabela 5.4 - Análises dos elementos maiores de rochas granitóides das suites Guanhães, Borrachudos e Bicas	42
Tabela 5.5 - Composição normativa (C.I.P.W.) de rochas granitóides das suites Guanhães, Borrachudos e Bicas.	43
Tabela 5.6 - Análises dos elementos traços de rochas granitóides das suites Guanhães, Borrachudo e Bicas	46
Tabela 5.7 - Análises químicas dos elementos terras-raras de rochas granitóides das suites Guanhães, Borrachudos e Bicas	47
Tabela 6.1 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Norte da área estudada	59
Tabela 6.2 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Centro-Norte da área estudada.	61
Tabela 6.3 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Centro-Sul da área estudada.	66
Tabela 6.4 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Sul da área estudada.	71
Tabela 7.1 - Síntese de dados geocronológicos da Província Pegmatítica Oriental.	83
Tabela 7.2 - Critérios utilizados por vários autores para reconhecer muscovita magmática.	85
Tabela 7.3 - Dados geocronológicos de corpos pegmatíticos da porção centro-oeste da Província Pegmatítica Oriental.	86
Tabela 7.4 - Síntese das análises geocronológicas dos Granitos Borrachudos e Gnaisse Guanhães	87
Tabela 8.1 - Composição química de feldspatos potássicos	101
Tabela 8.2 - Valores analíticos dos elementos alcalinos e alcalinos-terrosos	106
Tabela 8.3. Valores analíticos dos elementos alcalinos e alcalino-terrosos em ppm, em amostras de microclina	107
Tabela 8.4 - Dados relativos às diferentes razões utilizadas como indicadoras do fracionamento dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos	108
Tabela 8.5 - Razões utilizadas como indicadoras do fracionamento dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos	109
Tabela 8.6 - Valores de elementos do grupo das terras raras em feldspatos	115
Tabela 8.7 - Composição química das amostras de albita	118
Tabela 9.1 - Valores de d em $^{\circ}$ para os principais planos (hkl), característicos de cada um dos polítipos mais comuns.	
Tabela 9.2.A - Composição química de muscovitas das lavras da Generosa e Brejauba.	128
Tabela 9.2B - Composição química das amostras de biotita da área de tese.	132
Tabela 9.3 - Valores das razões, em muscovitas, utilizadas como indicadoras do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos.	134
Tabela 9.4. Valores das razões, em biotitas, utilizadas como indicadoras do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos.	135

Tabela 9.5. Dados analíticos sobre os elementos terras raras de micas das lavras da área de tese.	142
Tabela 9.6. Análise de ferro em biotita por metodologia convencional e por Espectroscopia Mössbauer	146
Tabela 10.1 - Propriedades físicas dos berilos da Lavra Ponte da Raiz, Santa Maria de Itabira.	149
Tabela 10.2 - Dados estruturais de berilos das lavras do Morro Escuro e Ponte da Raiz	150
Tabela 10.4 - Classificação e caracterização das inclusões fluidas de berilos da Lavra Ponte da Raiz.	156
Tabela 11.1 - Classificação sistemática dos nióbio-tantalatos	158
Tabela 11.1 - Classificação sistemática dos nióbio-tantalatos	167
Tabela 11.3 - Análises químicas de minerais da série euxenita-policrásio	172
Tabela 11.4 - Análises químicas de samarskita	174
Tabela 12.1 - Análises químicas de monazitas	180
Tabela 12.2 - Comparação entre os dados obtidos por Murata et al. (1958) para as razões indicadoras do fracionamento dos elementos terras raras e aqueles produzidos por este trabalho.	194

INDICE DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 3.1. Vista da cidade de Santa Maria de Itabira, MG.	15
Fotografia 3.2. Aspectos da vegetação da área próxima da Lavra da Generosa, Sabinópolis, MG.	17
Fotografia 5.1. Aspectos da pedreira de Gnaisses Guanhães em Vila Esperança.	28
Fotografia 5.2. Bloco de Gnáisse Guanhães da Pedreira de Vila Esperança.	28
Fotografia 5.3. Aspectos dos Gnaisses Guanhães em amostras de mão.	29
Fotografia 6.1. Cristal de Fenacita da Lavra do Talho Aberto. Exemplar do Museu de História Natural da UFMG	
Fotografia 6.2. Cristal de Fenacita da Lavra do Talho Aberto. Exemplar do Museu Municipal de Curvelo, MG.	
Fotografia 6.3. Vista da galeria de entrada da Lavra da Generosa.	
Fotografia 6.4. Lavra do Silivano.	
Fotografia 6.5. Aspectos do processo de lavra do Pegmatito da Posse.	
Fotografia 9.1. Cristal de muscovita da Lavra da Generosa.	
Fotografia 11.1. Cristal de columbita da Lavra da Generosa.	

INDICE DE FOTOMICROGRAFIAS

Fotomicrografia 8.1 - Lamela de pertita venular em microclína da Lavra da Generosa	95
Fotomicrografia 10.1	154
Fotomicrografia 10.2	154
Fotomicrografia 10.3	154
Micrografia 11.1	164
Micrografia 11.2	165
Micrografia eletrônica 12.1 - Monazitas da Lavra da Generosa	188
Micrografia eletrônica 12.2 - Monazitas da Lavra da Generosa	189

RESUMO

Os pegmatitos estudados nesta tese afloram na região localizadas à leste da Serra do Espinhaço, sendo limitada em sua porção meridional pelo Quadrilátero Ferrífero, tendo na extremidade norte o município de Serra Azul e ao sul o de Rio Piracicaba. A área em questão situa-se na borda oriental do Cráton do São Francisco. Os corpos pegmatíticos pertencem à Província Pegmatítica Oriental Brasileira e estão intrudidos em granitóides do embasamento cristalino.

Estes pegmatitos encontram-se encaixados, geralmente de forma discordante em rochas granitóides das suites dos Gnaisses Guanhães, Granitos Borrachudos e Gnaisses Bicas. Os granitos Borrachudos são caracterizados como peralcalinos, anorogênicos intra-placas, apresentando padrão de distribuição dos ETR com anomalia negativa de Eu, enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP. Os Gnaisses Guanhães e Bicas são também peralcalinos, anorogênicos, porém não puderam ser precisamente classificados quanto à ambiência geotectônica.

Foram cadastrados 68 corpos pegmatíticos, classificados como dos tipos simples e zonados simples. A mineralogia essencial destes corpos é constituída por feldspato potássico, quartzo, e micas muscovita e biotita. Berilo e columbita são minerais acessórios comuns a todos os corpos. Outros acessórios menos abundantes incluem a fluorita, o topásio, a monazita, a samarskita, a euxinita e a granada da série almandina-espessartita. Uma feição marcante é a presença de turmalina (schorlita) nos pegmatitos da porção norte, e de fenacita em um corpo da porção sul da Província.

Os feldspatos são representados por microclina máxima, pertitzada, cuja triclinicidade determinada por difração de raios X varia de 0,70 a 1,0 e albita de baixa temperatura. Em algumas lavras a microclina ocorre sob a forma da variedade gemológica amazonita, enquanto a albita em geral se apresenta sob a forma da variedade cleavelandita. Estes feldspatos são pobres em elementos alcalinos raros, cujas razões K/Rb, K/Cs e Rb/Cs situam-se próximas daquelas apresentadas pelas rochas graníticas da crosta. A proporção de Zr e Y é diretamente proporcional ao conteúdo destes elementos nas rochas encaixantes. Análises por ICP-MS revelaram $\sum \text{ETRL} > \sum \text{ETRP}$, e anomalia de Eu, ora positiva, ora negativa.

As micas são representadas pelos politipos 2M1 da muscovita e 1M da biotita. As razões K/Rb, K/Cs e Rb/Cs são similares às dos feldspatos e granitóides em

geral. O teor em F varia em média de 0,5 a 2,0%, e todos elementos alcalinos raros apresentam-se em quantidades semelhantes a dos pegmatitos radioativos de Moçambique, África.

Os berilos constituem o principal interesse econômico dos pegmatitos que são explorados como gemas (variedade água-marinha) e como minério de Be. Apresentam-se em prismas hexagonais, geralmente associados à bavenita. O baixo teor em álcalis raros destes berilos permite classificar os pegmatitos como pertencentes ao grupo A da classificação de Cerný.

Os nióbio-tantalatos são constituídos por columbita ($Nb \geq Ta$ e $Fe \geq Mn$) de politipo desordenado, samarskita e euxenita geralmente metamictizadas. As inclusões identificadas por MEV-EDS são uraninita, uranomicrolita, tengerita e minerais silicatados constituintes da ganga.

A monazita ocorre sob a forma de cristais subédricos decimétricos de cor castanha, contendo inclusões de huttonita secundária, principalmente nas bordas do cristal. O conteúdo em $ETRL > ETRP$, e os teores de Th e La caracterizam corpos de diferentes áreas do Distrito de Santa Maria do Itabira.

As inclusões fluidas determinadas através da espectroscopia de absorção no infravermelho em feldspatos, micas, berilo, quartzo e monazita são constituídas por soluções aquosas contendo CO_2 e as vezes CH_4 . No caso do berilo as inclusões fluidas foram ainda investigadas por meio de microtermometria fornecendo uma temperatura de homogeneização total de $310^\circ C$ a $460^\circ C$, que corresponde a temperatura de cristalização do mineral.

Os resultados obtidos no decorrer desse trabalho indicam que os pegmatitos do Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira são anatóticos anorogênicos e de idade brasileira. Os dados obtidos permitiram subdividir este Distrito em quatro campos distintos: Sabinópolis, Santa Maria de Itabira-Ferros, Serra Azul - Euxenita e o de Rio Piracicaba. Os corpos se caracterizam por conterem baixos teores em elementos alcalinos raros, nióbio-tantalatos com $Nb \geq Ta$, $Fe \geq Mn$, e enriquecimento em ETR, Y, U e Ca.

ABSTRACT

During this work we investigated the mineralogy and the geochemistry of pegmatites that crop out along the area located between the municipalities of Serra Azul (S 18° 25' 30" - W 43° 07' 15") and Rio Piracicaba (S 19° 54' 50" - W 43° 11' 25") in central Minas Gerais State, Brazil. The area which represents a north-south strip of the Brazilian Eastern Pegmatite Province is situated near the western border of the São Francisco Craton and in the eastern section of the Espinhaço Range.

The pegmatites are intrusive in basement rocks which are represented by the Borrachudos Granites, the Guanhães Gneissic Suite and the Bicas Gneisses. The former are anorogenic intraplate alkaline granites characterized by Eu negative anomalies as well as enrichment of the LREE over the HREE. Guanhães and Bicas are also anorogenic and peralkaline; however, their real tectonic environment has not been established yet.

All in all 68 pegmatites were enrolled in the area being classified as simple and simple zoned pegmatites. Major mineral constituents are K-feldspar, albite, quartz, muscovite and biotite. Beryl and columbite rank as the commonest accessory phases, whereas fluorite, topaz, monazite, samarskite, euxenite and garnet (almandine-spessartite) are less common accessories. Mineralogical zoning may be represented in the area by the occurrence of schorlite spotted in several northern pegmatites while phenakite was recorded in a single southern pegmatite.

Feldspars comprise high microcline whose triclinicity indexes range from 0.7 up to 1.0, as well as low-temperature albite. In addition, microcline may occur as the green gemological variety amazonite and albite as the colorless cleavelandite variety. Both microcline and albite are depleted in rare alkaline elements; moreover, their K/Rb, K/Cs and Rb/Cs ratios resemble those of crustal granitic rocks. Zr and Y amounts are directly proportional to their contents in the country rocks. ICP-MS analyses revealed that $\sum \text{LREE} > \sum \text{HREE}$, as well as positive and/or negative Eu anomalies.

Micas are represented by the 2M1 muscovite and 1M biotite polytypes. Their K/Rb, K/Cs and Rb/Cs ratios resemble those of feldspars and granitic rocks as well. F contents range from 0.5 up to 2.0 wt.%. Rare alkaline element contents, on the other hand, are similar to those of radioactive pegmatites from Moçambique, Africa.

Economic interest is centered mostly on beryl which is exploited either as the famous blue aqua-marine or as an industrial mineral. Usually beryls occur as well developed hexagonal crystals associated with bavenite. Their low contents in rare alkaline elements suggest that the pegmatites belongs to the Group A of Cerný's classification.

Nb-tantalates are represented by the ordered polytype columbite ($\text{Nb} \geq \text{Ta}$, $\text{Fe} \geq \text{Mn}$), samarskite and euxenite, being the latter usually metamictic. Crystalline inclusions identified in columbite by using MEV-EDS include uraninite, uranomicrolite, tengerite and gangue silica minerals.

Monazite occurs as brown subhedric dcm-size crystals which usually contain inclusions of secondary huttonite located mainly along the borders. Their amounts of LREE > HREE; Th and La contents on the other hand, have been used to characterize different pegmatite clusters in the Santa Maria do Itabira District.

Infrared spectroscopy revealed that feldspars, micas, quartz, beryl and monazite contain fluid inclusions whose compositions include besides H_2O , CO_2 and sometimes CH_4 . Regarding beryl, microthermometric studies showed that the total homogenization temperature of their fluid inclusions is 310-460°C.

Mineralogical and geological research carried out during this work revealed that the pegmatites of Santa Maria do Itabira District are anorogenic, anatectic and were intruded during the Brazilian orogeny. As for the District, it was divided in four different fields: Santa Maria do Itabira, Sabinópolis, Serra Azul-Euxenita and Rio Piracicaba. Geochemical studies revealed that all the pegmatites have low contents of alkaline rare elements and Nb-tantalates with $\text{Nb} \geq \text{Ta}$, $\text{Fe} \geq \text{Mn}$; in addition, they are enriched in ETR, Y, U and Ca.

AGRADECIMENTOS

Ao terminar a elaboração deste volume, que corresponde a cerca de dez anos de trabalhos desenvolvidos nesta área de pesquisa, volto no tempo e percebo que nele estão registradas as atividades de um grupo e não de uma pessoa ou duas, como faz entender a capa desta tese. Portanto, não seria correto encerrá-lo sem mencionar os nomes daqueles que desempenharam papel de extrema validade, nas atividades relativas a esta pesquisa, sabendo contudo que, injustiças devem estar sendo cometidas, pelo esquecimento ou pela não indicação nominal de algumas pessoas. A elas peço desculpas.

Em primeiro lugar posso dizer Ebenezer, até aqui nos ajudou o Senhor, pois reconheço a minha total dependência Dele, e apresento-lhe louvores recorrendo para isto às palavras do Rei Davi, "homem segundo o coração de Deus", transcritas do Salmo 29.

*"Tributai ao Senhor filhos de Deus,
tributai ao Senhor glória e força.
Tributai ao Senhor a glória devida ao seu nome,
adorai ao Senhor na beleza da santidade.
Ouve-se a voz do Senhor sôbre as águas,
troveja o Deus da glória;
o Senhor está sobre as muitas águas.
A voz do Senhor é poderosa;
a voz do Senhor é cheia de majestade.
A voz do Senhor quebra os cedros;
sim, o Senhor despedaça os cedros do Líbano.
Ele faz saltar como um bezerro;
o Líbano e o Sirion, como bois selvagens.
A voz do Senhor despede chamas de fogo.
A voz do Senhor faz tremer o deserto;
o Senhor faz tremer o deserto de Cades.
A voz do Senhor faz dar crias às coisas,
e desnuda os bosques;
e no seu templo tudo diz: Glória.
O Senhor preside aos dilúvios;
como rei presidirá para sempre.
O Senhor dá força ao seu povo,
o Senhor abençoa com paz ao seu povo."*

Dedico a minha gratidão à toda minha família, em especial ao meu esposo Israel, pela compreensão e paciência e aos meus filhos Carla Regina, Guilherme Augusto, Ana Cristina e Danielle, pois suportaram por inúmeras vezes a minha irritação e falta de atenção, principalmente durante os trabalhos de campo e também na elaboração deste texto.

Ao meu orientador, Prof. Darcy, pela dedicação e gentileza durante estes anos de trabalho conjunto, pela participação em trabalhos de campo e pelo auxílio inestimável, na elaboração do volume final, apresento-lhe a minha gratidão. Sou-lhe grata ainda, por suportar, durante estes sete anos, o aumento de sua carga administrativa, no envio de ofícios e justificativas, sempre pronto e atencioso.

Ao Prof. Dr. José Marques Correia Neves, por tudo que aprendi na área científica, e pelo prestígio e apoio aplicados por parte dele em conseguir meios externos ao país, na parte analítica, para o desenvolvimento desta tese. Muito obrigado.

Lembro-me ainda, que este trabalho não seria executado se não tivesse sido liberada de meus encargos didáticos, portanto menciono aqui a minha gratidão à UFMG e aos meus colegas, Professores do Departamento de Geologia.

Agradeço às agências financiadoras pelo suporte fornecido a esta tese. Destaque é devido à Capes e ao CNPq, por bolsas de pós-graduação a nível de doutorado e iniciação científica; à Fapemig (Auxílios n° CEX-328/87 e n° CEX-1137/92), CNPq (Auxílio n° 402.309/89-8 GL/FV/Pq) e PRPq-UFMG (Auxílios n° 23072.024305/92-97 e n° 23072.050565/94-15), pelos auxílios à pesquisa. Ao Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa, por seu discernimento e equilíbrio na coordenação de um dos projetos, principal financiador desta tese, mantido pela Fapemig, o meu muito obrigado.

Não poderia me esquecer nunca de agradecer a todos amigos do nosso Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), pois nele passo oito horas diárias de minha vida, e tenho o privilégio de gozar da amizade e auxílio, em diversas áreas de atividade, de todos os colegas ali sediados: Maria Cristina, Clayde, Rosália, Adélia e Cleto, por tarefas administrativas; Frederico e Ângela, pelos desenhos; Kácia, Nívea, Kênia e Robson, pelas análises químicas; Wenceslau, pelas lâminas e seções polidas e bipolidas; Carlos na área de informática; Evaristo e Ricardo, pela condução no campo. A todos os professores do CPMTC por todas as discussões proveitosas e sugestões apresentadas que foram utilizadas neste trabalho, a minha gratidão. Ao geólogo Javier Rios pelo auxílio prestado no estudo das inclusões

flúidas em berilo, muito obrigado. À Prof^a Maria Lourdes Souza Fernandes pelo trabalho conjunto realizado sobre os granitóides da região, a minha gratidão.

Sou grata ao Departamento de Química da UFMG, pelas análises de difração e fluorescência de raios X executados pela Prof.^a Dra. Clotilde Otília Barbosa de Miranda Pinto; e pelas numerosas análises de espectroscopia de absorção no infravermelho realizados pelo Rúbio Alves Moreira e seus colegas. Ao Departamento de Física da UFMG, agradeço pelo acesso permitido a todos os laboratórios, e ao Prof. Dr. Marcus Pimenta responsável pelo Laboratório de Espectroscopia Microraman.

Agradeço ainda às seguintes instituições e pessoas relacionadas abaixo.

Ao Departamento de Geologia da Escola de Minas de Ouro Preto, nas pessoas de seu chefe, Prof. Antônio Gomes e dos Professores Antônio Luciano Gandini e Júlio César Mendes, pelas análises de difratometria de raios X e confecção de seções delgadas polidas para análise de microsonda, e aos dois últimos por trabalhos de interação na pesquisa.

Ao geólogo Bruno F. Riffel da CBMM, e a esta Companhia, que por duas vezes nos prestou auxílio em seu laboratório, com análises de microscopia eletrônica em nióbio-tantalatos e monazitas. Ao Bruno e esposa, pelas muitas gentilezas e pela generosa acolhida em sua casa, minha eterna gratidão.

À l' Ecole de Minas de Saint Etienne pelas análises de microsonda eletrônica, e ao Prof. Dr. Essaïd Bilal pelo trabalho conjunto, gerador de duas publicações, sobre nióbio-tantalatos e fosfatos e silicatos de terras-raras.

À CDTN, através do Dr. Kazuo Fuzikawa e Dr. Waldemar Macedo por atividades conjuntas e orientação, quando tive a oportunidade de iniciar minha aprendizagem sobre inclusões flúidas e Espectroscopia Mössbauer. Ao Dr. Clécio Campi Murta, ao Dr. João Batista Santos Barbosa, à Prof. Dra. Solange Vaz Coelho e ao Prof. Roberto Luciano Leste Murta pela possibilidade de utilização dos meios, sob suas responsabilidades, colocados à nossa disposição. Ao Antônio Onório Duarte (Léis) pela atenção e disposição de colocar em funcionamento o Separador Magnético Frantz, adquirido pelo CPMTc da UFMG, e do treinamento de pessoal na sua utilização.

Aos bolsistas de iniciação científica Marcus Guarieiro, Dalva L. Castilho, Suely B. Gava, Haydée Cristina, Júlio C. Romeiro, Leonardo F. Faria, Adriana Borrelli Achtschin e Marcus Vinícius Diláscio, pelas atividades relacionadas ao projeto de tese, por eles realizados.

Atenção e gratidão especial de nossa parte, é dedicada ao José Geraldo Carvalho e ao Sr. Waltinho que nos levaram às ocorrências pegmatíticas, facilitando a visita e a amostragem dos corpos. Também, registramos o nosso agradecimento às pessoas de suas famílias, que nos hospedaram, oferecendo-nos a sua amizade, à primeira vista. A todos os garimpeiros e donos de lavras, que sem o seu auxílio este trabalho não teria se realizado, os meus mais sinceros agradecimentos. Àqueles que direta ou indiretamente nos auxiliaram, recebam o nosso muito obrigado.

Finalmente, agradeço ao casal amigo, Andréa e Bidu Ricardo, pela inestimável ajuda na editoração deste texto, pelas noites que não puderam dormir, para que o volume fosse impresso no tempo aprazado.

1. INTRODUÇÃO

As pedras preciosas e coradas brasileiras são provenientes, em grande parte, de regiões ricas em rochas denominadas pegmatitos, que impõem uma caracterização geológica, econômica, ambiental e social a várias áreas do nosso Brasil.

O Estado de Minas Gerais, como o próprio nome indica, é aquele onde são encontradas em sua porção oriental as maiores jazidas brasileiras de pegmatitos, ocupando uma terça parte da sua superfície.

A Província Pegmatítica Oriental (PPO) do Brasil delimitada e descrita por Paiva (1946), depois por Putzer (1976) e com os limites analisados por Correia Neves et al. (1986,1987), localiza-se nos estados de Minas Gerais, Bahia e Espírito Santo, sendo que sua maior área é encontrada em território mineiro.

1.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O trabalho desenvolvido durante a elaboração da presente tese, cobre uma faixa localizada na borda ocidental da PPO, sendo limitada ao sul pelo Quadrilátero Ferrífero e a oeste pela Serra do Espinhaço e praticamente no contacto com a borda oriental do Cráton de São Francisco.

O mapa da Figura 1.1 destaca a área abordada, onde são mostrados os principais municípios portadores de corpos pegmatíticos. Assim sendo, Serra Azul encontra-se no extremo norte seguida de Materlândia, Serro, Sabinópolis, Guanhães, Senhora do Porto, Conceição do Mato Dentro, Dolores de Guanhães, Ferros, Santa Maria de Itabira, Itabira, João Monlevade e finalmente, na porção meridional, Rio Piracicaba.

A ênfase atribuída ao longo do texto, às cidades de Itabira, Rio Piracicaba, Santa Maria de Itabira, Ferros, Guanhães e Sabinópolis está relacionada não só à sua importância geográfica, mas também com o fato destas cidades serem centros onde se desenvolve acentuada atividade extrativa de material pegmatítico.

Parte da PPO foi pesquisada durante e após a Segunda Guerra Mundial por equipe brasileira e da U.S. Geological Survey (Pecora et al. 1949), seguindo-se metodologia aplicada nas regiões pegmatíticas dos Estados Unidos da América por

FIGURA 1.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA DENTRO DA
PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL (PPO)
(MODIFICADO DE PUTZER, 1976)

Cameron et al. (1949). O propósito dessas atividades era descobrir novas fontes de mica e minerais contendo elementos estratégicos tais como berílio, lítio e tântalo.

1.2. OBJETIVOS

Os principais objetivos desta Tese de Doutorado estão explicitadas nos parágrafos seguintes:

1.2.1. Cadastramento dos corpos que afloram nesta área, contemplando assim uma das necessidades prioritárias indicadas pelos técnicos da CPRM. (Drumond 1985 e Vieira 1985).

1.2.2. Identificação e descrição das paragêneses de cada corpo, classificando-os segundo atributos morfo-texturais utilizados por Moura et al. (1978), para uma homogeneização e sistematização da forma de apresentação dos conhecimentos.

1.2.3. Estudo cristalquímico das principais fases minerais constituintes dos pegmatitos, com vistas à caracterização metalogenética dos corpos pegmatíticos desta área.

1.2.4. Proposição de um modelo para a evolução e gênese dos corpos, relacionando-os com suas respectivas encaixantes.

1.2.5. Zoneografia dos corpos na PPO e dentro do Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira, e discussão da sua importância econômica.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A estruturação do volume contempla uma abordagem do tema proposto, conduzindo o leitor a ter uma visão geral da área. Partindo-se dos aspectos gerais de cada corpo, focalizando-se a seguir a mineralogia e atributos cristalquímicos das diversas fases constituintes e culminando com a possibilidade de elaboração de um modelo genético e metalogenético, fundamentado nos dados obtidos, que seja aplicável a estas formações.

A metodologia empregada neste trabalho é bastante diversificada e portanto ocupa um dos capítulos iniciais, utilizando-se desde atividades clássicas de amostragem, determinação macroscópica de propriedades físicas, estudos microscópicos de minerais e rochas, até métodos pouco usuais como espectrometria Mössbauer.

Os principais grupos minerais a serem abordados são os essenciais e por isso comuns a todos os corpos, que estão presentes nas diferentes etapas da evolução interna dos corpos, tais como os feldspatos, as micas e as variedades de quartzo. As fases minerais características deste distrito, berilo, fenacita, nióbio-tantalatos e monazitas serão também estudadas em detalhe, pois fornecem informações que serão utilizadas na avaliação não só da potencialidade econômica dos corpos pegmatíticos, mas também das condições genéticas do material pegmatítico.

As conclusões obtidas, em cada um dos temas discutidos, serão sintetizadas em um dos capítulos finais, seguido por aquele referente às referências bibliográficas.

2. HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS CONHECIMENTOS

O Estado de Minas Gerais é conhecido internacionalmente por suas riquezas minerais, especialmente o ouro, ferro, diamante e gemas coradas.

Estes produtos despertaram a atenção dos portugueses desde a descoberta do Brasil, impelindo os bandeirantes e entradistas pelos vales dos principais rios em direção ao interior do estado.

O mapa da Figura 2.1 coloca em evidência as prováveis rotas percorridas pelas primeiras expedições realizadas em território do leste mineiro, com o objetivo de encontrar as cobiçadas pedras. Essas referidas incursões propiciaram a descoberta de jazidas pegmatíticas no vale dos rios Jequitinhonha, Pardo, Mucuri, São Mateus e Doce. Assim, sem o saber, desvendaram a existência de uma grande província mineral nesta região. Moura et al. (1981a e b) publicaram um mapa onde foram lançadas as ocorrências gemológicas brasileiras, tornando evidente que as regiões oriental de Minas Gerais e meridional da Bahia constituem uma importante área produtora de gemas no Brasil. Svisero & Franco (1987 e 1991) atualizando os dados existentes sobre as principais regiões brasileiras produtoras de gemas coradas e diamantes, confirmaram a grande vocação gemológica do Estado de Minas Gerais (Figura 2.2).

Cassedanne (1991) apresenta mapa de distribuição das jazidas de água-marinha e turmalina, mostrando que estes depósitos estão concentrados principalmente na região nordeste do Estado de Minas Gerais, com algumas ocorrências alcançando os Estados do Espírito Santo e Bahia (Figura 2.3). Esta região configura-se como a de maior concentração de gemas do grupo do berílio e boro do país, e talvez do mundo. Na porção ocidental desse mapa destaca-se a lavra da Grota das Generosas, o maior pegmatito estudado neste trabalho.

2.1. A PROVÍNCIA PEGMATÍTICA ORIENTAL

A Província Pegmatítica Oriental, (PPO), uma das três descritas por Paiva (1946), hoje se estende por uma área geográfica muito maior do que a inicial, sendo pesquisada desde o final do século dezenove. Marciano (1985) apresenta uma síntese do conhecimento das diferentes províncias pegmatíticas brasileiras.

Há, na atualidade, vários pesquisadores estudando, sistematicamente, diferentes áreas desta Província. J.M. Correia Neves tem desenvolvido atividades de

FIGURA 2.1 - PERCURSOS APROXIMADOS DAS PRIMEIRAS ENTRADAS E BANDEIRAS
(MODIFICADO DE MOURA et al. 1981)

FIGURA 2.2 - LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA APROXIMADA DAS PRINCIPAIS REGIÕES PRODUTORAS DE GEMAS CORADAS E DAS PRINCIPAIS PROVÍNCIAS DIAMANTÍFERAS DO BRASIL

(MODIFICADO DE SVISERO E FRANCO, 1991)

FIGURA 2.3 - PRINCIPAIS JAZIDAS BRASILEIRAS DE
 ÁGUA - MARINHA E TURMALINAS
 (MODIFICADO DE CASSEDANNE, 1991)

pesquisa no vale do rio Jequitinhonha, em Governador Valadares, Conselheiro Pena, Galiléia e ainda ao sul, em Bicas, (Correia Neves et al. 1987); A.H. Horn na região de Manhauçú, Espera Feliz, (Horn & Correia Neves 1992); J.C. Mendes em São José da Safira, (Mendes & Svisero 1993); A.C. Pedrosa Soares em Capelinha, (Pedrosa Soares et al. 1990); J.J.G. Queméneur em Araçuaí (Quéméneur et al. 1993) e ainda fora da Província, em São João del Rei, (Quéméneur & Gárcia 1993 e Quéméneur & Lagache), V.R.P.R.O. Marciano em Governador Valadares, (Marciano 1985) e na porção ocidental da PPO (Marciano et al. 1992a, 1992b, 1993).

A primeira síntese de dados publicados com a subdivisão sistemática dos corpos foi realizada por Correia Neves et al. (1986). Neste trabalho os autores dividem a PPO em unidades metalogenéticas menores. Pedrosa Soares et al. (1990) acrescentam novos dados aos da região do vale do Rio Jequitinhonha, e introduz o termo grupo pegmatítico, utilizando-o na sub-divisão do Campo Pegmatítico Coronel Murta-Virgem da Lapa. Os critérios adotados para agrupar os pegmatitos foram os propostos por Ginsburg's et al. (1979). Segundo esses autores os agrupamentos mais importantes são:

Província Pegmatítica é o conjunto de campos ou faixas pegmatíticas dentro de uma única província metalogenética. Denomina-se *Distrito Pegmatítico* a uma porção de uma província contendo vários campos pegmatíticos, separados uns dos outros através de características geográficas e geológicas. Um *Campo Pegmatítico*, por sua vez, é um território com pegmatitos de um único tipo de formação, com o mesmo ambiente geológico-estrutural, a mesma idade e fonte ígnea. Finalmente, o *Grupo Pegmatítico* é uma porção territorial de um campo pegmatítico, caracterizada por uma população local de corpos com um padrão morfológico, estrutural e textural bem definido e controle estrutural bem determinado.

Lobato & Pedrosa Soares (1993), em sua síntese sobre os recursos minerais do Cráton São Francisco, propuseram uma nova sub-divisão da PPO. Mantiveram os distritos e campos nomeados por Correia Neves et al. (1986), porém adicionaram novos campos aos antigos distritos e ainda criaram distritos novos. Embasados nos trabalhos de Marciano et al. (1992a, 1993) estabeleceram o Distrito Pegmatítico de Santa Maria de Itabira com dois novos campos: Guanhães-Sabinópolis e Ferros-Antônio Dias. Os trabalhos de Horn & Correia Neves (1992) fundamentaram o Distrito Pegmatítico de Caparaó. O esquema da Tabela 2.1 ilustra a divisão atual da Província.

Uma das finalidades deste trabalho é o estudo da distribuição regional destes corpos dentro da PPO, apresentando para tal análises mineralógicas e

DISTRITOS PEGMATÍTICOS									
1. ARAÇUAÍ				2. GOVERNADOR VALADARES		3. SANTA MARIA DE ITABIRA		4. CAPARAÓ	5. JUIZ DE FORA
CAMPOS PEGMATÍTICOS									
1.1 Virgem da Lapa- Coronel Murta- Rubelita	1.2 Ítinga	1.3 Ribeirão da Folha	1.4 Capelinha	2.1 Marilac	2.2 Galiléia- ConselheiroPe na	3.1 Guanhães- Sabinópolis	3.2 Ferros-Antônio Dias	4.1 Manhuaçu- Espera Feliz	5.1 Bicas-Mar de Espanha
CARACTERÍSTICAS									
1.1 Pegmatitos berilífero- turaliníferos	1.2 Pegmatitos estaniífero- litiníferos	1.3 Pegmatitos turaliníferos ricos em rubelita	1.4 Pegmatitos berilíferos	2.1 Mineralogia diversificada	2.2 Produtores de gemas	3.1 Pegmatitos pouco diferenciados, pobres em Li, Sn, Ta e B	3.2 Pegmatitos simples com pouca atividade metassomática	4.1 Pegmatitos cerâmi-cos, anatéticos e pegmatitos residuais de mineralogia mais complexa	5.1 Pegmatitos cerâmicos ricos em quartzo e caulim
Corpos tardios derivados de granitos alcalinos de tendência potássica, originados por fusão crustal.				Residuais	Anatéticos	Anatéticos	Anatéticos	Anatéticos/Residuais	Anatéticos
GRUPO PEGMATÍTICO									
Ps	Pzs	Pzc							
AUTORES									
Correia Neves et al. 1986 e Pedrosa Soares et al. 1990.	Correia Neves et al. 1986.	Lobato & Pedrosa Soares 1993.	Lobato & Pedrosa Soares 1993.	Correia Neves et al. 1986.		Lobato & Pedrosa Soares 1993.		Lobato & Pedrosa Soares 1993.	Lobato & Pedrosa Soares 1993.

TABELA 2.1 - Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais

Obs.: Ps- pegmatitos simples, Pzs-pegmatitos zonados simples, Pzc-pegmatitos zonados complexos.

geoquímicas que comparadas com dados da literatura fundamentarão esta zoneografia.

2.2 O DISTRITO DE SANTA MARIA DE ITABIRA

A porção ocidental da PPO tem sido explorada desde os primórdios deste século. Alguns corpos pegmatíticos foram citados, principalmente, pela presença de berilo, variedade água-marinha, e minerais raros, como fenacita, microclina variedade amazonita, monazita, fluorita, euxenita, etc..

O distrito pegmatítico de Santa Maria de Itabira é limitado a oeste pela Serra do Espinhaço e ao Sul pelo Quadrilátero Ferrífero, localizando-se na borda oriental do Cráton do São Francisco, na faixa Atlântica (Almeida & Hasuí 1984).

Pesquisa mineralógica-geoquímica nesta área foi iniciada com o trabalho de Wegner (1983) no Pegmatito da Generosa, seguida dos trabalhos de graduação orientados por Correia Neves, Horn e Marciano, em Santa Maria de Itabira e Sabinópolis. A partir de 1988, Marciano tem desenvolvido atividades de pesquisa desde o município de Rio Piracicaba, a nordeste do Quadrilátero Ferrífero, até Serra Azul de Minas, em uma faixa que abrange a porção central da região ocidental da PPO, como delimitada por Putzer (1976). Este projeto, financiado pela FAPEMIG e UFMG, vem responder a uma necessidade de maior conhecimento desta área, manifestada pelos técnicos da CPRM, em trabalhos executados para o DNPM (Drumond 1985 e Vieira 1985)

3. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DA ÁREA

O estado de Minas Gerais foi dividido em quinze zonas geográficas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), considerando as grandes diferenças que são apresentadas tanto pelo quadro natural como pelo quadro econômico.

A área de estudo desta tese está localizada em duas dessas zonas. A porção meridional, abrangendo quinze municípios, localiza-se numa faixa a nordeste da zona Metalúrgica, enquanto a parte setentrional da área de pesquisa situa-se na extremidade ocidental da zona do Rio Doce, estendendo-se por onze municípios.

Esta área está limitada pelos paralelos 20°00' e 18°00' ao Sul do Equador e pelos meridianos 42°55' e 43°17' a Oeste de Greenwich, equivalendo a um paralelogramo com 185 Km no lado maior e 40,7 Km no lado menor (Figura 3.1).

3.1. HIDROGRAFIA

A área pesquisada corresponde às sub-bacias do Rio Santo Antônio e do Rio Piracicaba, ambos afluentes da margem esquerda do Rio Doce.

O Rio Santo Antônio e seus tributários banham a maior parte da região, sendo o Rio Guanhães aquele afluente de sua margem esquerda responsável pela irrigação de toda a porção norte, desde Sabinópolis até Dorés de Guanhães. Ainda em sua margem esquerda, salienta-se o Rio do Peixe, que percorre a porção centro-ocidental. Na margem direita, banhando uma grande superfície dos três maiores municípios da região meridional, Itabira, Santa Maria de Itabira e Ferros, encontra-se o Rio do Tanque.

O Rio Piracicaba tem sua bacia nos municípios do extremo sul e sudeste da área objeto de pesquisa.

3.2. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Segundo Souza & Saadi (1993), a compartimentação geomorfológica regional, baseada na associação de características morfoestruturais e hidrográficas, enquadra a região do Alto Rio Doce como formada por colinas e cristas alongadas com direção N-S, e altitudes variando entre 500 e 700m.

FIGURA 3.1 - Relação dos municípios que compõem a área de pesquisa desta tese, localizada entre as zonas Metalúrgica (ZM) e Rio Doce (ZRD), situada na porção centro-ocidental do Estado de Minas Gerais.

No contexto regional a área é marcada por formas destacadas, constituindo a zona dos Pontões, evoluída através de processos de erosão diferencial e descamação concêntrica que atuaram sobre as rochas granito-gnáissicas. As formas de relevo desenvolvidas por mecanismos de dissecação fluvial sobre o embasamento granito-gnáissico apresentam-se como áreas de concentração de cristas elaboradas sobre quartzitos, itabiritos e xistos, que são as litologias presentes na área, constituindo assim a Zona de Colinas e Cristas. Estas morfologias acima descritas caracterizam o domínio dos "Planaltos Dissecados do Leste de Minas" (Boaventura et al. 1977).

O relevo mais acentuado existente na área é representado pelas serras do Elefante, Morro Escuro, Negra, do Catuni e dos Monos que chegam a alcançar a cota de 1.300m. A foto da região próxima à cidade de Santa Maria de Itabira, obtida a partir de um dos pontos mais elevados, consegue destacar esta morfologia e ainda colocar em evidência os desníveis de 400 a 500m entre os vales dos rios e os locais de afloramento dos corpos pegmatíticos que, por esta razão, encontram-se em diferentes estágios de caulinição (Fotografia 3.1).

A drenagem apresenta um padrão radial e dendrítico. Mostra espessos mantos de intemperismo que, quando desprovidos de coberturas vegetais, possibilitam o ravinamento e podem vir a evoluir para voçorocas. É nítido o controle estrutural dessas drenagens, num padrão aproximado norte-sul e leste-oeste, como pode ser visto no limite do município de Santa Maria de Itabira com o de Itabira pela forte inflexão sofrida pelo Rio do Tanque que corria com direção E-W e nesta área passa a N-S (Schettino et al. 1988).

Souza & Saadi (1993), chamam atenção para o fato de que quando o Rio Doce tem direção NNE-SSW, percorrendo o contato entre a fácies anfibolítica (margem esquerda) e a facies granulítica (margem direita) pode-se notar a presença de seixos quartzosos nos depósitos aluviais da margem direita. Na esquerda, por outro lado, ocorrem seixos repletos de elementos grosseiros oriundos da Serra do Espinhaço, mostrando assim a adaptação da compartimentação geomorfológica na área do Alto Rio Doce às características geológicas pré-cambrianas.

3.3. CLIMA

Segundo a classificação de Koppen, a área dessa tese apresenta um clima predominantemente do tipo Cwb.

Este tipo climático é caracterizado como mesotérmico com inverno seco, no qual o mês mais frio tem média inferior a 18°C, nos meses de junho e julho, chegando

FOTOGRAFIA 3.1 - Vista da cidade de Santa Maria de Itabira, MG, obtida de uma altitude aproximada de 1000m.

até 10°C. A média anual oscila entre 18°C e 20°C. A média anual de precipitação pluviométrica varia do sul da área, com 1.300mm, até ao norte com 1.500mm.

3.4. VEGETAÇÃO

Banderfer & Meireles (1987) classificaram a vegetação desenvolvida na área em quatro tipos, sendo dois nativos e os demais de caráter secundário.

A vegetação primária existente na região pertence ao domínio da Mata Atlântica que é caracterizada como floresta tropical semi-caducifólia, com algumas espécies decíduas em estações secas, anormais. A mata neste domínio é muito densa, com árvores que chegam a alcançar 50m de altura. Nas áreas de menor altitude, solos pouco profundos e seca mais acentuada no período de inverno, o número de espécies decíduas aumenta (Golfari 1975).

A cobertura nativa primária é observada nos topos das serras e nas encostas dos morros, nestes últimos com porte médio variando entre 7 e 8m e apresentando-se bastante densa. Nos dias de hoje estes locais foram quase totalmente atingidos pela atividade antrópica (extração vegetal, queimadas, carvoeiras e pecuária extensiva), a qual conduziu ao desenvolvimento de vegetação secundária denominada capoeira colonizando as encostas, sendo constituída por arbustos com espinhos e cascas espessas, que perdem as folhas durante a estação seca. Na Fotografia 3.2 da área de Sabinópolis observam-se estes aspectos referentes à vegetação nativa e secundária.

O último tipo de vegetação é o resultante do processo de reflorestamento executado principalmente pelas empresas mineradoras e siderúrgicas. O vegetal utilizado é o eucalipto, árvore nativa da Austrália do gênero *Eucalyptus* com mais de 700 espécies, bem aclimatada no Brasil.

3.5. SOLO

Nesta área os solos de constituição quartzo-argilosos, com coloração variando de rósea a cinza, são derivados de rochas granito-gnáissicas. Apresentam os horizontes A,B e C com espessuras variáveis, alcançando dimensões superiores a dois metros.

Os solos derivados de rochas máficas mostram coloração mais escura, castanho-avermelhada, textura argilosa e são de alta fertilidade. Os solos aluvionais ocorrem em acumulações nas planícies de inundação.

FOTOGRAFIA 3.2 - Vista geral da região de Sabinópolis, MG, próximo à Lavra da Generosa. Destaca-se a vegetação nativa primária nas encostas e arbustos constituindo capoeiras, nas áreas de menores altitudes.

4. MÉTODOS ANALÍTICOS

No decorrer desta tese utilizamos metodologia analítica diversificada, iniciada por técnicas usuais de amostragem, determinação de propriedades físicas macroscópicas, microscopia petrográfica e mineralógica, estudos microtermométricos de inclusões fluidas, até àquelas que obrigam a utilização de instrumentação sofisticada como microscopia eletrônica de varredura com EDS, microsonda eletrônica, e finalmente métodos pouco aplicados em geologia como espectroscopia Mössbauer.

A opção por esse variado espectro analítico deveu-se a alguns fatores que serão destacados a seguir.

a)-Alcançar os objetivos descritos no Capítulo 1 desse trabalho, que obrigam a conhecer aspectos da estrutura dos minerais, uma necessidade para compreender os processos da evolução e gênese do material pegmatítico.

b)-Complementar informações a respeito de atributos de amostras geológicas que via de regra não poderiam ser completamente caracterizadas por métodos isolados.

c)-Desenvolver e aplicar técnicas analíticas disponíveis em nossas universidades, ainda pouco divulgadas no meio geológico.

d)-Integrar pesquisadores de diferentes áreas constituindo grupos de pesquisas interdisciplinares capazes de ampliar o universo de soluções, em virtude da diversidade de formação dos pesquisadores. Este último fator corresponde às exigências impostas pela Ciência Moderna.

A escolha da metodologia usada foi estabelecida com o intuito de obter respostas para os problemas relacionados aos pegmatitos, ou seja, não houve em nenhum momento preocupação de introduzir mudanças nos métodos empregados. Assim sendo far-se-á a seguir uma breve sinópsse sobre cada uma das técnicas exercitadas neste trabalho.

4.1. ATIVIDADES DE CAMPO

O objetivo dos trabalhos de campo constituiu-se na amostragem segundo a estrutura interna dos corpos, sendo aproveitadas as bases geológicas disponíveis já

que atividades gerais de mapeamento básico, ultrapassam as finalidades desse trabalho.

Como grande parte dos pegmatitos desta região aflora a dezenas, ou mesmo centenas de metros acima do nível freático atual, o estado de alteração dos seus minerais, sobretudo dos feldspatos, é muito intenso. Em virtude deste fato, a metodologia empregada no processo de lavra, em alguns casos, é por desmonte hidráulico, o que chega a inviabilizar a execução de perfis segundo a estrutura do corpo.

O trabalho de lavra é normalmente realizado por garimpagem. Sendo intermitente, incentiva a abertura de galerias em busca das águas-marinhas ou outra espécie gemológica rentável, de forma desordenada. As quedas frequentes de preços conduzem à paralização do processo de lavra. Nesse caso as galerias são entupidas, natural ou artificialmente, para impedir que outro retome a tarefa com mais facilidade. Este recurso habitual impossibilita o acesso à amostragem sistemática orientada pela estrutura zonada do corpo.

Não raras vezes a lavra se realiza de forma totalmente desordenada, seguindo "linhas" que ocasionam o abatimento do corpo, paralizando assim os trabalhos. Outras vezes, em épocas chuvosas, as galerias são inundadas pela água, forçando o abandono do processo de extração mineral, impedindo a amostragem orientada.

Devido a estas situações relatadas acima e outras similares, dois tipos de amostragem foram utilizados.

a)-Amostragem segundo perfis com auxílio de trena e bússola, que aplicamos aos corpos maiores, com zonas evidentes ou não.

b)-Amostragem aleatória. Neste caso, as amostras disponíveis no local foram coletadas, representativas da paragênese total do corpo, contemplando as diferentes variedades de uma mesma espécie, e ainda as várias gerações de um mineral.

Essa amostragem, feita pessoalmente no campo, foi complementada com doações de espécimes realizadas por garimpeiros e proprietários de minas além de informações colhidas nas lavras.

4.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras coletadas foram numeradas, descritas macroscopicamente, e a seguir separadas em fases mineralógicas com auxílio de martelo quando centimétricas, ou com a utilização de estilete e lupa, quando milimétricas.

O peso específico foi determinado com auxílio de uma balança Mettler H54 AR, com capacidade máxima de 120g e precisão de 0,001. Outras propriedades físicas como cor, traço, dureza, clivagem, fratura e hábito cristalino foram também determinadas por metodologia usualmente seguida para o efeito.

Dando continuidade ao processo de preparação, sobretudo para fins geoquímicos, as amostras foram cominuidas em moinho de ágata e/ou carbeto de tungstênio. Amostras de rochas, após a primeira moagem, foram separadas através do emprego da técnica de líquido denso (bromofórmio), seguida pela separação em várias frações com utilização de separador magnético Frantz, modelo LB-1; pela aplicação de diferentes amperagens.

Confeccionaram-se lâminas delgadas de rochas e das associações minerais tais como intercrescimento gráfico, feldspato perítico e ainda minerais isolados. Seções polidas de nióbio-tantalatos e monazitas foram produzidas tanto para a utilização em microscópio sob luz refletida, como para análises na microsonda e microscópio eletrônico de varredura. Foram obtidas também, seções bipoladas de cristais de berilo para o estudo das inclusões fluidas.

4.3. ANÁLISES QUÍMICAS POR VIA ÚMIDA

Através de método gravimétrico, empregando-se amostras duplicadas, para uma maior precisão analítica, foram avaliados os conteúdos de H_2O^+ e H_2O^- no Laboratório de Química do Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa (CPMTC). Os teores de Fe^{2+} foram obtidos por dicromatografia através do método de Wilson.

O flúor foi analisado através do eletrodo para íon específico nos laboratórios da Geosol e do CNEN-CDTN em Belo Horizonte.

4.4. MÉTODOS INSTRUMENTAIS

Considerando a necessidade de se lançar mão de uma ampla gama de métodos de investigação, recorreu-se obrigatoriamente a um grande número de instituições uma vez que nenhum centro do país reúne todas as técnicas de análise atuais. Dar-se-á a seguir alguns esclarecimentos sobre os métodos ensaiados.

4.4.1. Métodos Ópticos

A microscopia óptica por luz transmitida e/ou refletida foi utilizada na descrição de lâminas delgadas e seções polidas, com determinação das propriedades ópticas dos minerais. Foram empregados microscópios de pesquisa do tipo Carl Zeiss, modelo Axiophot. Na descrição, classificação e mapeamento das inclusões fluidas, uma câmara clara foi acoplada ao microscópio Leitz, modelo Laborlux 12 Pol. 5. Nas análises microtermométricas das inclusões fluidas de berilos, utilizando uma platina de aquecimento-resfriamento operada no intervalo de temperatura -180°C a $+600^{\circ}\text{C}$, modelo Chaixmeca-Eurothern, montada neste microscópio.

4.4.2. Difratometria de Raios X

Esta técnica analítica vem sendo adotada na identificação de fases primárias e de alteração, dos polítipos das micas e do berilo, na caracterização do estado estrutural dos feldspatos e dos nióbio-tantalatos. Os dados obtidos pela difratometria foram empregados na determinação da cela unitária e outros parâmetros estruturais dos minerais. Essas análises foram processadas em diferentes equipamentos; a maior parte foi realizada no Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) da UFMG, algumas na Escola de Engenharia e outras no Departamento de Química, ambos da UFMG. Além disso, o Departamento de Geologia da UFOP analisou dezenas de amostras. O difratômetro existente no CPMTC é da marca Carl Zeiss Jena, modelo HZG-4.

4.4.3. Espectroscopia de Absorção no Infravermelho

Trata-se de metodologia vantajosamente utilizada no estudo das fases minerais, exceto nos óxidos, sulfetos e halóides que apresentam predomínio de ligações iônicas. Através desta metodologia foram também identificados os fluidos componentes das diversas fases minerais, variações composicionais nas micas, polítipos na biotita e berilo, polimorfos do feldspato potássico e os membros da solução sólida dos plagioclásios. As amostras foram preparadas por meio da diluição e prensagem com brometo de potássio, e subordinadamente iodeto de cério. O equipamento empregado, da marca Perkin-Elmer, modelo 283 B, pertence ao Departamento de Química da UFMG.

Para a comparação dos espectros obtidos com aqueles dos padrões, lançou-se mão de uma coleção de espectros de Moenke (1962).

4.4.4. Espectroscopia por Fluorescência de Raios X

Os elementos maiores e alguns traços foram analisados no Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) onde essa técnica vem sendo

usada rotineiramente para análises de rochas graníticas, feldspatos, biotita e muscovita. Análises de varredura foram obtidas antes das quantitativas para se ter uma avaliação dos elementos químicos que deveriam ser analisados. O equipamento do CPMTC é da marca Carl Zeiss Jena, modelo VRA-30.

4.4.5. Espectroscopia Micro Raman

O aparelho de Micro Raman existente no Departamento de Física da UFMG, foi empregado na identificação dos componentes das inclusões fluidas do berilo, principalmente de fases transparentes ao infravermelho como o N_2 .

4.4.6. Espectroscopia Mössbauer

O conhecimento do conteúdo em Fe^{2+} e Fe^{3+} bem como da coordenação destes íons na estrutura são de grande importância na petrologia e na cristalochímica. O local ocupado por estes cátions pode ser precisamente conhecido através desta metodologia que foi desenvolvida em amostras de biotita nos laboratórios da CNEN-CDTN em Belo Horizonte.

Os espectros Mössbauer foram obtidos utilizando-se uma fonte ^{57}Co (Rh). A amostra foi pulverizada e prensada com uma solução de resina acrílica, sendo posteriormente evaporada.

4.4.7. Plasma Induzido (ICP)

Esta metodologia foi aplicada a 31 amostras de feldspatos, muscovita e biotita para obtenção de dados em ppm dos elementos do grupo das terras raras. Estas análises foram realizadas nos laboratórios da Geosol em Belo Horizonte.

Dezesseis amostras das rochas encaixantes dos pegmatitos foram analisadas por ICP, quanto aos óxidos dos elementos maiores incluindo SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO e TiO_2 . Essa mesma técnica foi empregada na análise dos elementos traços Ba, Sr, Cr, V, Cu, Zn, Be, Pb e Ga. Utilizando-se monocromador específico para os elementos de terras raras (ETR) foram determinados ainda o Y e os elementos deste grupo. Essas últimas dezesseis amostras foram submetidas à análise no Laboratório do Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa, após preparação prévia em coluna com resina de troca iônica Dowex 50X 8-400, utilizando-se equipamento sequencial da Spectro modelo FYM 05.

4.4.8. Fotometria de Chama

Os elementos Na, K e Li foram analisados através desta metodologia, nos laboratórios do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC), em um fotômetro marca Micronal, modelo B280.

4.4.9. Microscopia Eletrônica de Varredura

Onze seções de nióbio-tantalatos e oito de monazitas, de várias lavras da região, foram submetidas à esta metodologia, no Laboratório da CBMM em Araxá, através de um equipamento marca Cambridge, modelo Stereoscan 200 com sistema de dispersão de energia (EDS), modelo Link AN 10000, acoplado a computador. ZAF-4 é a identificação do software de aplicação. A utilização do sistema de energia dispersiva (EDS) foi eficiente na identificação das fases minerais associadas às fases principais, bem como às muitas inclusões encontradas. As micrografias eletrônicas das imagens em vários aumentos ilustrarão as diferentes feições das fases analisadas.

4.4.10. Microsonda Eletrônica

As amostras de nióbio-tantalatos e monazitas apresentam-se zonadas e com muitas inclusões. As análises químicas só podem ser realizadas por microsonda eletrônica, pois através desta metodologia pontual, consegue-se a composição química do hospedeiro e das inclusões, permitindo ainda conhecer a variação composicional devido ao zoneamento. Essas análises foram desenvolvidas em um aparelho Camebox da L'Ecole des Mines de Paris à Fontainebleau, no bojo de trabalho conjunto iniciado em Agosto de 1992, pelas atividades de campo realizadas pela autora juntamente com os Profs. J.M. Correia Neves e Essaïd Bilal.

4.4.11. Espectrometria de Massa

As muscovitas foram as fases minerais escolhidas para serem submetidas a análises de datação através do método K/Ar. No decorrer deste trabalho foram executadas quatro datações no Centro de Pesquisas Geocronológicas do IG-USP.

O objetivo da utilização desta metodologia é de situar na escala temporal, a relação dos pegmatitos da área estudada com outros da PPO e ainda com corpos de outras províncias pegmatíticas brasileiras. Em adição, pretende-se estabelecer comparações entre os pegmatitos e suas encaixantes, buscando interpretações que levem a elaboração de um modelo genético para os mesmos.

5. AS ROCHAS ENCAIXANTES

Os corpos pegmatíticos da área estudada estão encaixados em granitóides os quais podem ser divididos em quatro diferentes grupos. No município de Rio Piracicaba as lavras do Talho Aberto e Pé da Serra estão posicionadas no Gnaiss Bicas da Formação Elefante, do Grupo Piracicaba, pertencente ao Supergrupo Minas. Os pequenos veios ou lentes pegmatíticas que ocorrem em João Monlevade estão relacionados ao Gnaiss Monlevade do Supergrupo Rio das Velhas. Nos municípios de Itabira, Santa Maria de Itabira, Ferros, Conceição do Mato Dentro, Sabinópolis, Dolores de Guanhanes e outros, ocorre o Ortognaiss Borrachudos (GB) e também o Gnaiss Guanhanes (GG). Os corpos pegmatíticos que afloram ao norte dos municípios de Rio Piracicaba e João Monlevade são sempre encontrados encaixados nos GG nas bordas dos GB, porém sem penetrá-los. Apenas um pegmatito, dentre os estudados, encontra-se posicionado no GB, corpo identificado como Granito São Félix (Grossi Sad et al. 1990).

Os ortognaisses Borrachudos receberam a designação "Granito Borrachudos" de Dorr & Barbosa (1963), tendo sido descritos no trabalho desses autores na Quadricula de Itabira, local tipo desta rocha. Os GB têm sido alvo do interesse por parte de vários pesquisadores, tais como, Herz (1970), Schorscher & Müller (1977), Schorscher & Leterrier (1980), Kanig (1985), Chemale Jr. et al. (1986), Chemale (1987), Grossi Sad et al. (1990), Schoscher (1992), Dussin et al. (1993), Dussin (1994), Machado (1994), entre outros. A Suite Guanhanes (Grossi Sad et al. 1990) que compõe a maior parte do complexo basal regional na área homônima, é constituída por rochas granito-gnáissicas, que têm sobre si faixas de rochas supracrustais mais ou menos isoladas. A este conjunto de rochas supracrustais metavulcânicas-metassedimentares (xisto máfico-ultramáfico, xisto pelítico e/ou grafitoso, formação manganífera e ferrífera, rocha calciossilicatada, mármore, quartzito, gnaiss grauvaquiano), Grossi Sad e colaboradores denominou de Grupo Guanhanes. As rochas desta suite foram inicialmente estudadas por Barbosa (1949), em amostras oriundas da foz do Rio Guanhanes. Vários outros autores dedicaram-se ao estudo destas rochas, nestes últimos anos, como Lauenstein (1984), Müller et al. (1986), Machado et al. (1989), Teixeira et al. (1990), Dussin (1994), Machado (1994) e Souza Fernandes et al. (1994 e 1995). Machado (1994) designa os gnaisses encaixantes dos

corpos pegmatíticos da região de Nova Era - Itabira de metagranitóides foliados com fluorita (MGF).

Uma síntese sobre as rochas granito-gnáissicas com ocorrência na borda sudeste do Cráton do São Francisco focalizando os trabalhos realizados por vários autores, é encontrada na obra de Schorscher (1992).

Este capítulo tem como propósito o estudo de três dos quatro grupos de gnaisses acima relacionados, apresentando dados de microscopia óptica, difratometria de raios X, espectroscopia de absorção no infravermelho, análises químicas completas, incluindo os elementos terras raras. A comparação dos dados obtidos com os publicados tomará lugar de destaque neste capítulo, tendo em vista a possibilidade de se obter conclusões mais fundamentadas. A Figura 5.1 exhibe a localização das amostras estudadas pertencentes às suites Borrachudos, Guanhães e Bicas.

5.1. ASPECTOS MACROSCÓPICOS

A distinção entre as três suites foi primeiramente estabelecida, através dos aspectos petrográficos apresentados em amostra de mão e na observação dos afloramentos. As rochas da Suite Guanhães apresentam-se ora como gnaisses e migmatitos, grosseiramente bandados, de granulação média, caracterizados pela alternância de níveis quartzo-feldspático rosados, centimétricos a milimétricos, com níveis máficos, mais enriquecidos em biotita, pouco alterados; ou então, ora como rochas bastante heterogêneas do ponto de vista textural e composicional, totalmente alteradas.

Os litotipos da Suite Borrachudos, apresentam-se em algumas áreas com estrutura gnaissificada, enquanto em outras, o aspecto da textura se assemelha mais a de um granito isotrópico. A granulação destas rochas é predominantemente grosseira, com os agrupamentos de minerais máficos, orientados linearmente, conferindo-lhes a aparência peculiar, que foi nomeada como Granito Borrachudos. Em alguns locais, como em Dolores de Guanhães, no corpo denominado Urubu, percebe-se a presença de anfibólio a olho nu. Nesta área, Carneiro & Romeiro (1994) descreveram três litotipos, baseados na ocorrência e proporção dos minerais máficos mais abundantes. Um litotipo contendo biotita e anfibólio, outro contendo somente biotita (litotipo de maior frequência), e finalmente aquele que só possui anfibólio.

Os Gnaisses Bicas de coloração cinza claro, apresentam granulação fina a média, sendo constituídos principalmente de agregados de biotita em matriz de microclina e quartzo, bastante semelhantes ao Granito Borrachudos, segundo Reeves (1966).

FIGURA 5.1. Mapa de localização das amostras estudadas onde os círculos cheios representam os GB e os quadrados os GG.

Em uma pedreira, situada ao norte da cidade de Ferros, a uma distância de 25km, na localidade denominada Vila Esperança, pode-se constatar que há variedade de tipos gnáissicos, entre as rochas da Suite Guanhães. As Fotografias 5.1 e 5.2 chamam a atenção para a estrutura gnáissica e a quantidade de material quartzo-feldspático existente nestas rochas. Estes níveis leucocráticos são portadores de cristais centimétricos de biotita e de feldspato potássico, ocorrendo ainda granadas e magnetitas bem desenvolvidas, passíveis de catação manual a vista desarmada, chegando a alcançar dimensões apreciáveis. Nesta área tem-se a impressão de que o processo de anatexia foi retratado cena após cena, de uma forma bastante didática. Em um afloramento com apenas 2.000 a 3000m² de área, observam-se litotipos gnáissicos pouco orientados, seguidos por outros com foliação característica bem definida, ao lado de rochas com textura lit-par-lit próprias dos migmatitos. Finalmente, são encontradas nesta área rochas que alcançam texturas pegmatóides. As Fotografias 5.3, são ilustrativas, das feições anteriormente descritas, em amostra de mão.

A porção nordeste da área de tese é caracterizada por rochas gnáissicas com maior grau de alteração do que estas referidas no parágrafo anterior, mostrando ainda grande heterogeneidade composicional e textural. Estas rochas pertencem ao Grupo Guanhães, constituído por rochas metavulcânicas-metassedimentares que se encontram sobrepostas às rochas da Suite Guanhães (Grossi Sad et al. 1989). Os pegmatitos associados a este tipo gnáissico do Grupo Guanhães são portadores de turmalina preta, schorlita, sendo portanto diferenciados dos demais corpos encaixados nas rochas das suites Guanhães e Borrachudos.

5.2. ASPECTOS MICROSCÓPICOS

As análises microscópicas das rochas das três suites revelaram os aspectos texturais, estruturais e mineralógicos, descritos a seguir. Os litotipos da Suite Guanhães apresentam-se como rochas gnáissicas com textura granolepidoblástica, marcada pela orientação das micas. A microclina pertítica é o mineral dominante, podendo mostrar-se com alterações de caulim e sericita. O quartzo exibe feições como extinção ondulante e bandas de deformação. O plagioclásio apresenta contatos reativos com a microclina, marcados pela presença de bordas de albitização e mimerquitas, mostrando-se frequentemente saussuritizado. Entre os minerais máficos destaca-se a biotita, que ocorre, muitas vezes transformada em muscovita e clorita. Como fases acessórias que apresentam frequência mais baixa pode-se citar granada, allanita, zircão, fluorita, titanita, apatita e monazita. A muscovita na maior parte das lâminas analisadas é encontrada numa proporção que varia de 0,2 a 2,2%, entretanto

FOTOGRAFIA 5.1. Ocorrência do Gnaiss Guanhões, na localidade de Vila Esperança no Município de Ferros. Afloramento que dista 25km do trevo de entrada para Ferros, localizado à margem esquerda da rodovia BR 120, na direção Ferros-Guanhões. Vista de um bloco deslocado por explosão da pedreira, onde os níveis leucocráticos constituídos por material quartzo-feldspático determinam um bandamento característico.

FOTOGRAFIA 5.2 - Vista da mesma pedreira salientando um bloco no qual as porções leucocráticas ocupam uma área muito maior e apresentam aspectos de movimentação. Há cristais centimétricos de granada, biotita e feldspato nesta ocorrência.

FOTOGRAFIAS 5.3 - Amostras de mão do gnaiss Guanhães procedentes da Pedreira de Vila Esperança, salientando aspectos característicos da textura e composição mineralógica. Feição A - Cristais centimétricos de microclina, variedade amazonita, com planos de clivagem aparentes. Feição B - Rocha constituída por cristais centimétricos de biotita, granada, feldspato e quartzo. Feição C - Gnaiss de granulação média com bandamento incipiente. Feição D - Gnaiss com bandamento típico e textura "lit-par-lit". Feição E - Rocha com textura pegmatóide, contendo fáculas de biotita.

as lâminas da amostra 5079 apresentam 13,9 e 16,8% deste mineral. As amostras pertencentes à Suite Guanhães foram aquelas que mostraram maior variação modal em uma mesma amostra de mão (Tabela 5.1).

As rochas da Suite Borrachudos exibem textura inequigranular, por vezes foliada, devido à orientação da biotita e anfibólio que são os mais abundantes minerais máficos. Estes ortognaisses são compostos essencialmente por microclina, quartzo, plagioclásio, biotita e anfibólio. Os acessórios mais comuns são fluorita, allanita, zircão, titanita e apatita. Ocorrem secundariamente carbonatos e pistacita (Tabela 5.2). Um grande problema encontrado por pesquisadores que têm se dedicado ao estudo destas rochas reside na determinação precisa da composição química do anfibólio, pois este grupo mineral desempenha papel importante na classificação das rochas graníticas. A Tabela 5.3 apresenta uma síntese dos dados petrográficos segundo alguns autores, mostrando que não há concordância quanto à composição do anfibólio, mas também sobre outros aspectos, fato que sugere a possibilidade de que cada um deles esteja descrevendo um litotipo diferente. Verifica-se a necessidade da execução de um mapeamento faciológico destas ocorrências. Nesta tabela, a designação Gnaisses Guanhães é utilizada segundo proposição de Grossi Sad et al. (1990) como conjunto de granitóides gnaissificados, presentes no embasamento regional. A Tabela 5.2 além de apresentar os resultados das análises modais para as rochas da Suite Borrachudos, expõe a moda para o Gnaiss Bicas. Através dos dados destas tabelas percebe-se que os minerais essenciais, varietais e acessórios destas três suites são os mesmos, porém com uma frequência de ocorrência bem distinta. As amostras da Suite Guanhães mostram uma variação percentual acentuada dos minerais essenciais, mesmo em uma única amostra de mão, como se pode comparar nas análises referentes à amostra 5123_{1,2,3}. As da Suite Borrachudos exibem uma maior homogeneidade composicional nos minerais essenciais, entretanto os percentuais dos minerais varietais mais frequentes tais como a biotita e o anfibólio, determinam litotipos diferentes (Carneiro & Romeiro 1994). Na Suite Guanhães os minerais varietais mais abundantes são biotita e muscovita, enquanto o anfibólio só foi encontrado nesta faixa composicional em uma das amostras. Dentre os acessórios, a Suite Borrachudos apresenta fluorita > zircão > titanita > allanita > muscovita > apatita > monazita, enquanto a Suite Guanhães mostra zircão > titanita > monazita > fluorita = apatita > allanita. Quanto aos minerais opacos os intervalos de frequência são os mesmos para as duas suites. Para o Gnaiss Bicas foi obtida uma única análise modal, relativa à rocha encaixante do pegmatito Talho Aberto.

MINER/ N° ROC	5076	5079 ₁	5079 ₂	5080D ₁	5080D ₂	5080D _{3L}	5080D _{3M}	5080I ₁	5080I ₂	5080I ₃	5123 ₁	5123 ₂	5123 ₃	INTERVALO
QUARTZO	43,6	47,8	43,0	23,5	22,9	7,6	51,3	49,4	24,1	31,5	25,2	38,1	40,6	7,6 - 51,3
MICROCLINA	29,8	18,9	21,1	57,2	49,1	71,4	15,8	18,4	50,8	32,8	46,3	36,6	39,2	15,8 - 57,2
PLAGIOCLÁSIO	12,3	13,0	13,6	16,4	19,1	20,1	12,9	22,5	23,1	29,2	10,9	18,0	17,0	10,9 - 29,2
BIOTITA	12,2	2,4	3,6	2,2	5,4		15,0	7,7	1,4	3,7	3,2	5,6	2,0	1,4 - 15,0
MUSCOVITA	0,2	13,9	16,8	0,2	2,2			0,2	0,2	1,4				0,2 - 16,8
FLUORITA	0,2				<0,1		0,4			0,3		0,5	0,3	<0,1 - 0,5
TITANITA		0,8	0,6							<0,1	<0,1		0,1	<0,1 - 0,8
ALLANITA			0,4				0,2				0,2	0,2	0,2	0,2 - 0,4
ZIRCÃO	1,0	1,8	0,7	0,1	0,5		2,6	1,4	<0,1	0,3	1,3	0,5	0,2	<0,1 - 2,6
APATITA	0,1	0,5	<0,1	<0,1	0,4	0,5	0,5		<0,1	0,2	0,5	<0,1		<0,1 - 0,5
OPACOS						0,3	0,1			0,1	1,3	0,2	0,1	<0,1 - 1,3
ANFIBÓLIO									<0,1	<0,1	8,7			<0,1 - 8,7
EPIDOTO *	0,1	0,1	0,2	<0,1	<0,1		0,8	0,1		<0,1	1,9			<0,1 - 1,9
MONAZITA		0,6												0,6
CARBONATO *		X									X			
SAUSSURITA *	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	
CLORITA *	X		X					X	X	X	X	X	X	
SERICITA *	X		X	X	X	X	X	X	X	X				
CAULIM *														

TABELA 5.1 Dados relativos às análises modais de amostras dos Gnaisses Guanhães, sendo apresentado na última coluna da direita o intervalo de frequência para cada mineral. Os minerais marcados com * representam fases de alteração. O sinal gráfico X demonstra a presença desta fase na análise microscópica. (MINER.= mineral, ROC.= rocha). Os índices que seguem o número da rocha representam o número de lâminas de uma mesma amostra de mão.

MINER / N° ROC	4540	50771	50772	5086	50881	50882	5219	INTERVALO	4888
QUARTZO	45,4	41,5	33,6	40,8	49,8	41,4	49,0	33,6 - 49,8	44,6
MICROCLINA	32,2	12,0	19,9	37,6	33,5	38,2	38,0	12,0 - 38,2	14,8
PLAGIOCLÁSIO	12,2	35,4	34,4	9,0	8,6	11,6	13,0	8,6 - 35,4	18,6
BIOTITA	5,6	7,8	6,6	4,8	1,6	1,7		1,6 - 7,8	0,2
MUSCOVITA	0,5				0,2	<0,1		<0,1 - 0,5	19,8
FLUORITA	1,8	0,4	0,9	0,6	1,3	1,3		0,4 - 1,8	1,4
TITANITA	0,8	0,2	<0,1	0,3				<0,1 - 0,8	
ALLANITA	0,6	0,6	0,4	0,6	0,4	0,3		0,3 - 0,6	
ZIRCÃO	0,3	0,6	0,5	1,1	0,4	0,3		0,3 - 1,1	0,3
APATITA	0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,4	0,1		<0,1 - 0,4	
OPACOS	<0,1	<0,1	0,1	0,4	1,2	0,4		<0,1 - 1,2	
ANFIBÓLIO		0,8	2,6	3,3	2,3	4,2		<0,1 - 4,2	
EPIDOTO *		0,4	0,4	<0,1	X	<0,1		<0,1 - 0,4	<0,1
MONAZITA									
CARBONATO*		X	X	X	X	X			
SAUSSURITA*	X	X	X		X	X			
CLORITA *	X	X		X	X	X			X
SERICITA*	X		X	X	X	X			X
CAULIM *		X			X	X			X

TABELA 5.2 - Dados relativos às análises modais de amostras dos Granitos Borrachudos e do Gnaiss Bicas (coluna da extrema direita). A penúltima coluna da direita representa o intervalo de frequência para cada mineral constituinte das rochas da primeira suite. Os minerais marcados com * representam fases de alteração. O sinal gráfico X demonstra a presença desta fase na análise microscópica. (MINER.= mineral, ROC.= rocha). Os índices que seguem o número da rocha representam o número de lâminas de uma mesma amostra de mão.

Autor(es)		Barbosa 1949	Dorr & Barbosa 1963	Müller et al. 1986	Chemale Jr. 1987	Souza 1988
GRANITO S BORRACHUDOS	Corpo	Urubú	Itabira		Itabira	Itabira
	Localização		Córrego Borrachudos		Itabira	Mina Belmont
	Cor	branca, mosqueada	cinza claro		Rósea	cinza clara
	Índice de cor	_____	_____			4,1 a 17,2
	Textura	gnáissica de granulação média	granulação grosseira, algumas vezes porfiroclásticas		granulação grosseira, porfiroclástica, holocristalina	granoporfiroblástica a granolepidoporfiroblástica média a grosseira
	Estrutura	foliação marcada	fracamente foliada		foliadas em maior ou menor grau	linear, determinada por grupo de cristais de biotita, alongada coincidentemente com a foliação
GRANITO S GUANHÃES	Composição mineralógica	Q, FA, P, B (F, Ap, M)	Q, FA, P, B (F, M, G, E, Tu, O, C)		Q, FA, P, B (M, F, Ca, C, Z, E, G, A, O)	Q, FA, P, B, A (F, E, Al, M, C, Ca, Z, T, G, Ap, O)
	Análise modal	_____	Q-45 a 75% P-15 a 20% FA-15 a 25% B<12%		Q-28 a 35% B-3 a 5% FA-53 a 64% P-1 a 3%	Q-30 a 60% B-10% FA-19 a 40% A-0 a 8,2% P-3 a 38%
	Anfibólio	_____	_____		riebeckita	fluotaramita
GRANITO S BICAS	Denominação	gnaisse silimanítico				gnaisse granítico não lenticular
	Localização	Guanhães	Itabira ao sul da quadrícula	Guanhães, MG		Itabira-Mina Belmont
	Cor	leucocrática	_____	_____		cinza claro rosado
	Índice de cor	_____	_____	_____		2,4 a 6,0
	Textura	granulação média a grosseira	alotriomórfica granular a granoblástica	granoblástica a lepidonematoblástica		granolepidoblástica fina a média
	Estrutura	foliada	forte foliação contorcida com dobras ptigmáticas	bandada		fortemente linear, foliação pouco desenvolvida
GRANITO S GUANHÃES	Composição mineralógica	Q, FA, Sil, M, B, O (R, M, O)	Q, FA, P, B (E, M, C)	Q, P, FA, M, B, G (O, Z, Ap, E, Ca, A)		Q, FA, P, B (A, Al, F, M, O, E, Z, C, Ap, Ca)
	Análise modal	_____	Q-40 a 60% FA, P-30 a 55% B-15 a 30%	Q-32 a 34% B-3 a 12% FA-19 a 40% O-2,2% P-22 a 33% Ap, G-1,6%		Q-41 a 54% B-1 a 5% FA-26 a 37% A-0 a 1,5% P-10 a 26%
	Anfibólio	_____	_____	Mg-hastingsita		fluotaramita

Tabela 5.3 - Síntese sobre análises microscópicas publicadas de rochas granitóides das suites Guanhões, Borrachudos e Bicas.

Obs: R=rutilo, Tu=turmalina, Q=quartzo, A=anfíbólio, G=granada, FA=feldspato alcalino, F=fluorita, Ap=Apatita, Mo=monazita, E=clinozoisita-epidoto, Al=allanita, M=moscovita, B=biotita, P=plagioclásio, C=clorita, Ca=carbonato, Z=zircão, T=titanita, O=opacos, Sil=sillimanita, (...) = acessória

Autor(es)		Grossi Sad et al. 1990	Guimarães 1992	Dussin 1994	Machado 1994
GRANITOISBARROS	Corpo	Itabira, Peti, Açucena, Morro do Urubu, São Félix, São Porto	Itabira	São Félix, Urubu, Açucena e Itauninha	Itabira
	Localização		Itabira		Itabira
	Cor	cinza claro, rosado			hololeucocrático a leucocrático
	Índice de cor				
	Textura	adota a descrição de Dorr & Barbosa 1963. granulação grosseira	granoblástica	porfírica de grão médio	porfiroblástica de fluxo a poiquiloblástica
	Estrutura	não foliados ou mal foliados	foliados		forte lineação dos minerais máficos, foliada
	Composição mineralógica	Q, FA, P, B (F, M, G, E, Tu, O, A, Z, Al)	Q, FA, P, B (C, Al, Z, E, Ap, R, M, T, F, O)	Q, FA, B, A, P (F, Z, Ap, Al, O, C, M)	Q, FA, P, B, E, F (Z, T, O, Mo, Ca, M, Ap, G)
GRANITOISBARROS	Análise modal				Q-30% B-6% FA-±55% E-1,5% P-2% F-1,5%
	Anfibólio	riebeckita	riebeckita	Fe-hornblenda a Fe-tschermakítico-hornblenda	fluotaramita
GRANITOISBARROS	Denominação	gnaisse Guanhões.	complexo gnáissico-migmatítico.		metagranitóides foliados com fluorita.
	Localização	Entre Rio Piracicaba e Guanhões	Itabira		Itabira
	Cor	acinzentados	cinza		cinza claro a ligeiramente róseo
	Índice de cor				
	Textura	granoblástica a granolepidoblástica	granolepidoblásticas		granolepidoblástica de granulometria média-fina
	Estrutura	bandada ou não	foliados		foliação bem desenvolvida
	Composição mineralógica	P, Q, FA, B (Ap, Z, Al, G, O, Ti, Sil, F)	Q, FA, P, B (C, Al, Z, E, Ap, R, M, T, Ca)		Q, FA, P, B, M (F, E, Al, O, C)
GRANITOISBARROS	Análise modal				Q-±30% B<5% FA-35 a 50% M-2 a 3% P-10 a 25%
	Anfibólio		tschermakita		

Tabela 5.3 - (continuação).

Obs: R=rutilo, Tu=turmalina, Q=quartzo, A=anfíbólio, G=granada, FA=feldspato alcalino, F=fluorita, Ap=Apatita, Mo=monazita, E=clinozoisita-epidoto, Al=allanita, M=muscovita, B=biotita, P=plagioclásio, C=clorita, Ca=carbonato, Z=zircão, T=titanita, Sil=sillimanita, O=opacos, (...) =acessória.

Autor(es)		Reeves 1966	
G N A I S S E M O N L E V A D E	Denominação Localização	Monlevade. Sudoeste da quadrícula de Monlevade	Monlevade. Quadrícula de Monlevade
	Cor Índice de cor	cinza rosado	cinza claro
	Textura	granulação grossa inequigranular	granulação fina equigranular
	Estrutura		
	Composição mineralógica	Q, P, FA, B (A, M, Ca, Ap)	Q, FA, P, B (M, Z)
	Análise modal	Q-38% B-7% FA-38% P-15%	Q-25% B-10% FA-50% P-10%
	Anfibólio	hornblenda	
G N A I S S E S B I C A S	Denominação Localização	Bicas Rio Piracicaba	
	Cor Índice de cor	cinza claro	
	Textura	granulação fina a média	
	Estrutura		
	Composição mineralógica	Q, FA, B (F)	
	Análise modal		
	Anfibólio		

Tabela 5.3 - (continuação).

Obs: R=rutilo, Tu=turmalina, Q=quartzo, A=anfíbólio, G=granada, FA=feldspato alcalino, F=fluorita, Ap=Apatita, Mo=monazita, E=clinozoisita-epidoto, Al=allanita, M=muscovita, B=biotita, P=plagioclásio, C=clorita, Ca=carbonato, Z=zircão, T=titanita, O = opacos,(...)=acessória.

A composição modal das rochas granitóides estudadas lançada no diagrama Q-A-P classifica-as como granitos dos campos 3a e 3b de Streckeisen (1976). Esta classificação está concordante com os dados obtidos por Tolentino Jr. et al.(1988), Souza (1988 e 1991), Souza Fernandes (1994 e 1995). Quando comparados com os dados apresentados no trabalho de Dussin, T. (1995), estas rochas são menos alcalinas, pois a maioria dos valores analíticos dos GB pesquisada por esta autora caem no campo 2, referentes aos alcali-feldspato granito.

O estudo tipológico dos zircões do Granito São Félix tem mostrado a predominância dos tipos com uma única pirâmide {101} e desenvolvimento reduzido do

prisma {110}. Ocorrem ainda tipos com duas pirâmides, onde {101} é muito mais desenvolvida que {211}, e com dois prismas onde {100} é muito mais importante do que {110}. Segundo Dussin, I.A. (1984) "as amostras de zircões do Granito São Félix, analisados sobre os diagramas de Pupin (1976, 1980 e 1988), mostram uma boa coerência petrológica e petrogenética com os dados geoquímicos e isotópicos". Esta rocha é definida como um granito alcalino a hiperalcalino, hipersolvus, que se aproxima dos complexos anorogênicos. A temperatura de cristalização dos zircões é elevada, cerca de 850°C, indicando a natureza seca do magma. Os zircões do granito Itauninha foram também estudados por Dussin, I.A. (1984). O estudo tipológico mostrou uma evolução de formas mais complexas. As formas com dois prismas são as mais frequentes, havendo um maior desenvolvimento das formas {100} sobre as {110}. A análise destes zircões desenvolvida através dos diagramas de Pupin, apontam uma evolução do campo alcalino em direção ao campo calcioalcalino, com temperatura de cristalização entre 800° e 850°C. Estes dados lançados sobre diferentes diagramas permitiram a classificação do granito Itauninha como alcalino subsolvus a subalcalino de complexos anorogênicos (Dussin, I.A.1994, Dussin, T.1994). Os granitos São Félix e Itauninha pertencem à Suite Borrachudos (Chiodi Filho 1989, Grossi Sad et al. 1990).

5.3. ANÁLISE MINERALÓGICA

As amostras de rochas destas suites foram britadas e moidas em moinho de carbeto de tungstênio. Após a etapa, de cominuição as amostras resultantes foram separadas em três frações através do processo de líquido denso, com a utilização do bromofórmio. Duas frações leves, uma com peso específico < 2,83, e outra com peso específico = 2,83, e uma fração pesada. Esta última fração foi submetida à separação magnética através de um ímã (fração magnética), e o restante da amostra foi selecionado quanto à susceptibilidade magnética utilizando-se um Separador Magnético Frantz. Através desta metodologia foram obtidas cinco outras frações, conforme a amperagem empregada (0,10A, 0,15A, 0,20A, 0,30A e > 0,30A).

O real objetivo desta preparação física foi, em primeiro lugar, o da identificação inequívoca de todos os minerais constituintes destas rochas, principalmente daqueles cuja concentração se encontra abaixo de 10%. A segunda finalidade consistiu na comparação entre os componentes das fases fluidas das rochas das suites Borrachudos e Guanhões. O primeiro objetivo só foi parcialmente alcançado devido a não obtenção do grau de liberação total das fases através do processo de moagem. Entretanto, foi conseguido um aumento de pelo menos dez vezes na concentração das fases. Todas as frações foram submetidas às metodologias analíticas de difração de raios X e espectroscopia de absorção no infravermelho.

5.3.1. Análise por difratometria de raios X

Através do processo de identificação da composição mineralógica das frações leves, constatou-se a presença de feldspato potássico, nas formas polimórficas microclina e ortoclásio, além de albita e quartzo, ocorrendo ainda algumas reflexões da muscovita, nas amostras de todas as três suites. Os valores obtidos para a triclinicidade (Δ) dos feldspatos potássicos, através do método desenvolvido por Goldsmith & Laves (1954), variaram de $\Delta = 0$ a $\Delta = 0,92$, sendo que as amostras do Granito Borrachudos, da região denominada Morro do Urubu, apresentaram valores no intervalo de $\Delta = 0$ a $\Delta = 0,59$, (Figura 5.2), semelhantes aos encontrados por Schorscher (1992) nas amostras da região de Itabira e circunvizinhanças. Estes dados podem ser indicativos de uma cristalização precoce do feldspato potássico, feição que tem sido observada em granitos alcalinos de outras partes do mundo (Whalen et al. 1987), e confirmada através dos resultados obtidos pela petrologia experimental (Clemens et al. 1986). Este dado reforça as observações microscópicas destas amostras, quando foram observadas inclusões de feldspato potássico em biotita e anfibólio, e ainda a forma anédrica destes minerais ferromagnesianos.

A fração magnética constituída principalmente por magnetita foi contaminada pela presença da biotita, ilmenita e granada, devido ao parcial grau de liberação das fases minerais. Dentre as frações obtidas por variação na susceptibilidade magnética, aquela que foi separada por corrente de 0,10A concentra a maior massa, de tal forma que a soma das frações leves, magnética e de 0,10A alcançou, em algumas amostras, mais que 99,5% da massa total da rocha moída. A biotita é a fase mineral mais abundante desta última fração, seguida de anfibólio, allanita e granada nas amostras dos GB, enquanto nos GG ocorre muscovita além das fases anteriormente citadas.

5.3.2. Análise por espectroscopia de absorção no infravermelho

Esta metodologia analítica teve sua máxima utilização devido a não obtenção do grau de liberação das fases minerais, constituintes de uma mesma fração. Entretanto foi possível conhecer a composição dos fluidos que participaram no processo de formação destas rochas. O principal constituinte fluido é a água que apresenta tanto a banda de estiramento entre 3.425 e 3.465cm^{-1} , como a de deformação a 1.625cm^{-1} , esta segunda menos característica. Salientamos ainda as presenças, em menor quantidade do CO_2 em 2.330cm^{-1} e de hidrocarboneto não aromático, possivelmente metano, com duas bandas de absorção, uma a 2.860cm^{-1} e a outra a 2.930cm^{-1} . Na região compreendida entre 700cm^{-1} e 800cm^{-1} aparecem as bandas de absorção capazes de diferir os polimorfos do feldspato potássico entre si, e os plagioclásios. Contudo não se

FIGURA 5.3. Espectros de absorção no infravermelhos

conseguiu efetuar uma distinção precisa entre as rochas da Suite dos Borrachudos e as da Suite Guanhães, pois as bandas de absorção dos minerais componentes desta fração, são muito próximas. A Figura 5.3 exibe os diagramas das três suites, mostrando as regiões onde ocorrem as bandas de absorção das fases fluidas e aquela onde aparece as bandas de estiramentos da ligação Al-O. Há maior quantidade de fase fluida nos diagramas referentes às amostras da Suite Guanhães. A amostra 3878, encaixante do pegmatito Ponte da Raiz desta mesma suite apresenta as quatro absorções referentes à albita em 723cm^{-1} , 742cm^{-1} , 762cm^{-1} e 786cm^{-1} . Estas mesmas feições podem ser observadas nas amostras 4540 pertencente à Suite Borrachudos, encaixante da Lavra da Generosa, e 4888, Gnaiss Bicas, encaixante do pegmatito Talho Aberto. Estas duas últimas amostras apresentam um aumento no conteúdo da fase fluida, demonstrando terem sido afetadas pelo processo de cristalização dos corpos pegmatíticos.

5.4. GEOQUÍMICA

Dados químicos das rochas encaixantes foram obtidos através de análises executadas nos laboratórios do Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa da UFMG. Os elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO e TiO_2) e alguns elementos traços (Ba, Sr, Cr, V, Cu, Zn, Be, Pb e Ga), foram determinados por ICP. Na_2O , K_2O e Li_2O foram dosados por fotometria de chama; FeO , por volumetria; P_2O_5 por colorimetria; H_2O^+ e H_2O^- por gravimetria. Os elementos terras raras e o Y foram determinados por ICP, utilizando-se policromador específico para estes elementos. Os elementos traços Th, Ta, Nb, Cs, U, Rb, Hf e Zr foram analisados por fluorescência de raios X, nos laboratórios da Geosol.

Das 16 amostras analisadas, 8 pertencem à suite dos GB, 7 procedem da suite dos GG e somente uma é proveniente dos Gnaisses Bicas.

Dados geoquímicos dos GB foram publicados por Herz (1970), Chernale Jr. (1987), Chiodi Filho (1989), Grossi Sad et al. (1990), Schorscher (1992), Dussin T. (1994), Machado (1994), Fernandes et al. (1994 e 1995), entre outros. Lauenstein (1984), Müller et al. (1986), Chiodi Filho (1989), Grossi Sad et al. (1990) e Fernandes et al (1994) apresentam dados sobre os GG. Os Gnaisses Bicas foram analisados por Reeves (1966) e Herz (1970).

5.4.1. Elementos maiores

Os resultados percentuais para os elementos maiores apresentam uma significativa dispersão dos valores nas amostras da Suite Guanhães, enquanto os da Suite Borrachudos mostram uma marcada uniformidade composicional. Os dados

FIGURA 5.3. Espectros de absorção no infravermelhos

analíticos obtidos para os elementos maiores encontram-se relacionados na Tabela 5.4., enquanto os resultados do cálculo da norma CIPW constam da Tabela 5.5.

Os GB apresentam um teor mais elevado em sílica, geralmente acima de 74%; entretanto ambas suites encontram-se na faixa entre 72 e 77%. A presença de acmita e hiperstênio normativos é constante nas amostras dos GB, enquanto nas amostras dos Gnaisses Guanhães somente algumas delas apresentam esses minerais. A magnetita normativa não é encontrada nos GB que só apresentam ilmenita, enquanto nos GG estes dois minerais são encontrados, com maior frequência para a ilmenita. Apenas uma amostra, de todas as examinadas, apresentou córindon, mesmo assim em um percentual igual a 0,27. Quatro amostras dos GG mostram wolastonita normativa.

Utilizando-se os dados normativos obtidos e o diagrama de Le Maitre (1989), observa-se que as rochas da Suite Borrachudos se dispõem segundo os campos 3a (principalmente), 3b e 8* indicativos de rochas sienograníticas, monzoníticas e quartzomonzoníticas, respectivamente. As composições normativas das amostras da Suite Guanhães distribuem-se pelos campos 3a, 3b, 4, 7* e 8*, com uma amostra no campo dos granodioritos (4) e outra no campo referente aos quartzosienito (7*), ocorrendo uma maior dispersão dos pontos (Figura 5.4.). O índice de Shand da maioria das amostras das duas suites recai na classificação peralcalina, sendo que algumas amostras dos GG e a única do Gnaisse Bicas ocorrem com índice metaluminoso ou peraluminoso (Figura 5.5). A distribuição dos pontos neste último gráfico é semelhante àquela apresentada pelas rochas estudadas por Dussin T.(1994). Os diagramas das Figuras 5.6. e 5.7. de Middlemost 1985 e Debon & Le Fort 1983, respectivamente, confirmam o caráter alcalino destas rochas. Neste último gráfico, o campo onde estão localizados os pontos das análises refere-se ao dos leucogranitos (Debon & Le Fort 1983-2).

5.4.2. Elementos menores e traços

Análises dos elementos traços incluindo os elementos terras raras são apresentados nas Tabelas 5.6. e 5.7., respectivamente, para as amostras dos GB, dos GG e do Gnaisse Bicas.

O diagrama triangular de El Bouseily & El Sokkary (1975) discrimina bem os GB dos GG, onde os primeiros figuram nos campos dos granitos normais e granitos fortemente diferenciados, enquanto os outros recaem nos campos dos granodioritos, granitos anômalos e granitos normais (Figura 5.8.). Através da análise deste diagrama comparado com os dados de Chemale Jr. (1987) conclui-se que os GG são rochas menos diferenciadas do que os GB. Nesta mesma figura estão lançados os dados de Machado (1994). Há concordância entre os dados desta tese, os de Chemale Jr e os

Suíte	Guanhães							Borrachudos								Bicas
Nº Rocha Óxidos	3878	4367	5076	5079	5080 D	5080 I	5123	4540	5077	5086	5088	5218	5219	5220	5227	4888
SiO ₂	72,4	74,2	72,8	76,7	73,9	74,1	76,3	76,3	76,2	76,1	73,4	71,0	77,5	74,7	75,6	76,3
Al ₂ O ₃	14,21	14,44	13,85	11,96	13,64	12,48	10,56	10,62	10,81	11,04	12,13	13,72	10,98	11,43	11,05	12,05
Fe ₂ O ₃	0,20	0,13	0,24	0,86	0,06	0,75	1,17	0,12	0,59	0,56	0,92	1,24	0,06	0,59	0,40	0,45
FeO	1,10	0,38	1,24	0,35	0,80	0,13	1,42	1,55	2,18	1,57	1,44	1,15	1,50	1,51	1,71	1,24
CaO	1,48	2,97	1,12	0,22	0,59	0,71	0,83	0,85	0,70	0,77	0,60	0,61	0,65	0,87	0,65	0,18
MgO	0,39	0,18	0,36	0,53	0,28	0,20	0,24	0,02	0,02	0,03	0,09	0,01	0,01	0,09	0,04	0,06
MnO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03
TiO ₂	0,27	0,05	0,18	0,13	0,07	0,08	0,25	0,13	0,26	0,23	0,19	0,10	0,10	0,20	0,19	0,12
Na ₂ O	6,47	6,46	5,33	3,17	4,25	4,81	3,78	3,88	5,03	4,38	4,99	5,19	4,65	4,58	3,78	3,37
K ₂ O	3,55	0,84	4,40	5,30	6,57	6,38	5,48	5,48	5,30	5,48	5,25	5,90	5,60	5,25	5,30	5,36
P ₂ O ₅	0,10	0,02	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02
H ₂ O ⁻	0,07	0,13	0,07	0,09	0,08	0,09	0,09	0,07	0,07	0,07	0,13	0,19	0,06	0,18	0,12	0,20
H ₂ O ⁺	0,38	0,27	0,32	0,91	0,30	0,49	0,27	0,51	0,43	0,26	0,25	0,35	0,42	0,19	0,13	1,19
Fe ₂ O ₃ tt																
Total	100,63	100,08	100,09	100,2	100,49	99,38	100,44	99,55	101,64	100,53	99,43	99,49	101,55	99,64	99,04	100,57

Tabela 5.4 - Análises dos elementos maiores de rochas granitóides das suítes Guanhões, Borrachudos e Bicas, realizadas por espectroscopia de plasma induzido no laboratório do CPMTc.

42

Suítas	Guanhães							Borrachudos								Bicas
Minerais Normativos																
Nº da Amostra	3878	4367	5076	5079	5080 D	5080 I	5123	4540	5077	5086	5088	5218	5219	5220	5227	4888
Quartzo	19,06	27,60	21,65	35,85	23,88	26,81	34,64	35,65	33,16	33,03	26,71	19,02	35,30	30,57	33,58	33,53
Coríndon				0,27												
Zircão	0,04	0,01	0,04	0,03	0,02	0,02	0,06	0,06	0,12	0,08	0,09	0,03	0,05	0,06	0,07	0,04
Ortoclácio	21,02	4,98	26,07	31,42	38,97	37,81	32,47	32,55	31,41	32,47	31,13	35,07	33,27	31,12	31,41	31,96
Albita	51,85	54,66	45,07	26,82	31,13	26,82	21,80	22,06	24,22	24,48	31,37	35,47	23,20	27,62	26,04	28,51
Anortita		7,35		1,04												0,23
Acmita	0,58		0,02		0,17	2,17	3,39	0,35	1,71	1,62	2,66	3,59	0,17	1,71	1,16	
Na Metassilica	0,52				1,08	2,66	1,48	2,41	3,82	2,50	1,82	1,02	3,71	2,14	1,08	
Diopsídio	5,19	1,96	4,60		2,62	1,34	3,57	3,74	3,05	3,38	2,70	2,66	2,84	3,77	2,91	
Wolastonita	0,49	2,15				0,83	1,01									
Hiperstênio			0,43	1,32	0,78			0,72	2,07	1,39	1,21	0,60	1,13	0,74	1,46	1,64
Magnetita		0,19	0,34	0,78												0,65
Hematita				0,32												
Ilmenita	0,51	0,09	0,34	0,25	0,13	0,15	0,47	0,25	0,49	0,44	0,36	0,19	0,19	0,38	0,36	0,23
Apatita	0,25	0,05	0,20	0,08	0,08	0,07	0,07	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,07	0,02	0,05
Espodumênio	1,03	0,79	1,15	1,29	1,66	1,26	1,38	1,37	1,29	1,23	1,22	1,49	1,39	1,33	0,87	2,12
Total	100,53	99,84	99,91	99,47	100,53	99,94	100,34	99,19	101,39	100,66	99,29	99,16	101,28	99,51	98,94	99,48

Tabela 5.5 - Composição normativa (C.I.P.W.) de rochas granitóides das suítes Guanhães, Borrachudos e Bicas.

FIGURA 5.4 - Diagrama de Le Maitre (1989) onde Q= quartzo, P= plagioclásio. Os dados normativos lançados nele são de GB (quadrados), GG (círculos) e Gnaiss Bicas (triângulo). Os campos 3a e 3b correspondem à composições sienograníticas e monzograníticas, respectivamente, 4 granodiorito, 7* quartzosienito e 8* quartzomonzonito.

FIGURA 5.5 - Representação do índice de alcalinidade de Shand para os GB (quadrados), GG(círculos) e Gnaiss Bicas (triângulo), no diagrama de Maniar & Piccoli (1989).

FIGURA 5.6 - Representação da composição química dos GB (quadrados), GG (círculos) e Gnaisses Bicas (triângulo). Segundo Middlemost (1985), o campo 3 se refere aos álcalis-granitos e o 6 aos granitos.

FIGURA 5.7 - Granitos Borrachudos (quadrados), Gnaisses Guanhões (círculos) e Gnaisses Bicas (triângulo) representados no diagrama de Debon & Le Fort (1983). Campo IV: Domínio Metaluminoso.

Suíte	Guanhães							Borrachudos								Bicas
	3878	4367	5076	5079	5080 D	5080 I	5123	4540	5077	5086	5088	5218	5219	5220	5227	4888
Li	385	295	430	480	620	470	515	510	480	460	455	555	520	495	325	790
Ba	1215	85	981	430	977	760	813	2016	237	643	674	32	33	2187	316	156
Sr	513	405	279	44	166	134	102	40	22	58	38	12	13	90	86	12
V	< 5	< 5	9	7	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Cu	1,0	15	1,1	1,3	3,5	3,8	1,8	44	2,5	3,7	2,9	2,8	10	8,5	1,4	1,9
Zn	61	23	43	36	188	223	67	65	102	85	90	40	37	39	97	70
Be	1,1	8,6	3,2	1,3	4,1	4,4	4,6	11,3	4,4	4,1	7,1	7,6	2,8	5,1	3,4	11
Pb	69	68	78	78	145	109	73	100	78	79	72	109	83	71	73	84
Zr	117	47	125	101	64	81	168	264	73	132	114	108	216	197	156	121
Cr	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
*Th	10	12	22	27	15	29	37	72	50	45	40	119	86	49	34	74
*Ta	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	7	< 5	< 5	20	< 5	< 5	< 5	5
*Nb	< 5	< 5	16	16	< 5	5	15	39	56	34	51	183	58	15	24	46
*Cs	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	9	< 5	< 5	< 5	23
*U	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	15	< 10	< 10	< 10	33	< 10	< 10	< 10	< 10
*Rb	108	50	171	257	358	253	217	412	217	209	254	529	456	233	210	732
*Hf	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	16	< 8	9	< 8	< 8	< 8	8	< 8
Ga	22,1	20,1	22,9	20,0	17,3	17,2	23,9	35,5	31,1	24,9	34,8	39,5	27,7	23,4	23,6	41,9
Ba/Sr	2,37	0,21	3,52	9,77	5,89	5,67	7,97	50,40	10,77	11,08	17,74	2,67	2,54	24,30	3,67	13
K/Rb	272,87	139,40	20,58	171,17	152,32	209,29	209,59	110,39	202,72	217,61	171,57	92,57	101,93	187,04	209,48	60,78

Tabela 5.6 - Análises dos elementos traços de rochas granitóides das suítes Guanhães, Borrachudos e Bicas, realizadas por espectroscopia de fluorescência de raios X na Geosol (*) enquanto as demais foram realizadas por espectroscopia de plasma induzido no laboratório do CPMTc.

Suíte	Guanhães							Borrachudos								Bicas
Nº Rocha Terras raras	3878	4367	5076	5079	5080 D	5080 I	5123	4540	5077	5086	5088	5218	5219	5220	5227	4888
La	26,21	13,27	48,2	45,39	21,73	36,59	99,10	145,6	234,6	137,6	130,5	77,3	79,9	95,3	124,7	60,0
Ce	44,58	24,16	91,5	87,2	37,10	67,7	179,7	259,1	438,6	251,2	242,4	145,4	159,2	180,5	234,8	127,6
Nd	15,91	10,06	37,73	33,35	12,89	25,94	65,0	93,0	178,1	102,1	100,6	52,5	62,1	68,6	95,0	51,9
Sm	2,03	2,07	6,55	6,37	2,00	4,44	10,92	17,76	30,32	17,97	19,09	10,99	13,47	11,71	17,41	10,15
Eu	7,85	0,42	0,89	0,40	551	0,63	1,96	0,50	1,13	1,54	1,41	0,32	0,50	0,88	0,87	0,98
Gd	1,24	2,48	5,22	5,07	2,00	3,10	8,81	17,41	24,73	15,82	17,71	11,07	14,40	9,61	15,41	8,48
Dy	0,66	1,73	2,86	2,66	1,16	1,66	7,40	19,70	20,25	13,44	14,75	12,99	17,52	8,22	13,26	8,95
Ho	0,11	0,27	0,44	0,37	0,25	0,29	1,53	4,45	4,25	2,83	2,98	2,94	4,08	1,75	2,82	1,91
Er	2,64	0,62	0,83	0,75	0,79	0,66	3,92	13,54	11,25	7,59	7,73	8,63	12,45	4,58	7,29	5,64
Yb	0,28	0,55	0,64	0,39	0,24	0,59	3,39	13,81	10,0	6,91	6,27	9,00	12,91	4,10	6,20	6,36
Lu	0,04	0,08	0,09	0,06	0,04	0,08	0,38	1,59	1,19	0,82	0,70	1,02	1,53	0,47	0,73	0,74
Y	3	6	10	8	3	7	38	127	103	70	72	85	120	48	68	52

Tabela 5.7 - Análises químicas dos elementos terras-raras de rochas granitóides das suítes Guanhães, Borrachudos e Bicas, realizadas por espectroscopia de plasma induzido no laboratório do CPMTc.

FIGURA 5.8 - Diagrama Rb-Sr de El Bouseily e Sokkory (1975). Os GB são representados pelos círculos, os GG pelos quadrados e o Gnaiss Bicas pelo triângulo cheio. Os pontos e as cruzes são dados retirados de Chemale Jr (1987) referentes ao Granito Itabira e ao Granitóide Santa Bárbara respectivamente. Os dados de Machado (1994) estão apresentados com asterisco e triângulos vazios, que simbolizam, respectivamente os Granitos Borrachudos e Metagranitóides foliados da região de Nova Era-Itabira.

de Machado quanto aos GB, porém não há similaridade entre os metagranitóides foliados com fluorita, encaixantes dos pegmatitos da área de Nova Era com os GG, encaixantes dos pegmatitos estudadas nesta tese.

Foram construídos aracnogramas que apresentam a distribuição de alguns elementos incompatíveis normalizados pelos valores do manto primitivo-PRIM (Taylor & McLennan 1985), para as rochas da Suite Guanhães (Figura 5.9 A) e da Suite Borrachudos (Figura 5.9 B). A comparação entre as duas permite visualizar uma grande similaridade entre elas, apesar da homogeneidade dos dados obtidos para os GB em relação à dispersão daqueles relativos aos GG. Os gráficos indicam enriquecimento em Rb, Pb, Th, La, Nd, Dy, Lu e Zn nas duas suites. Os elementos K, Nb, Ba, Sr, Eu, Ti e V apresentam anomalias negativas em relação a seus vizinhos, para todas as amostras analisadas. Os GG mostram uma fraca depleção em relação ao Y quando comparados com os GB, enquanto estes últimos apresentam nítidas anomalias negativas para Zr e positiva para o Sm.

5.4.3. Diagramas de caracterização de ambiência geotectônica

A observação da Figura 5.10, que traz o diagrama R1xR2 de La Roche et al. (1980), com as subdivisões de Batchelor & Bowden (1985), revela que os pontos representativos das análises dos GB recaem no campo 5, isto é, o campo dos granitos anorogênicos, enquanto os pontos dos GG apresentam-se dispersos entre os campos 5 (quatro amostras) e 4 (duas amostras), com maior tendência para serem classificados como anorogênicos. As Figuras 5.11 e 5.12 que representam as relações $Al_2O_3 \times SiO_2$ e $FeO / (FeO+MgO) \times SiO_2$ discriminam, nitidamente os GB como granitos ligados a rifteamento. Os GG mostram uma classificação pouco precisa, contudo a maioria dos pontos localiza-se no campo dos granitóides POG (granitóides pós-orogênicos).

Os diagramas de Pearce et al. (1984) envolvendo os elementos traços na caracterização dos ambientes geotectônicos estão representados nas Figuras 5.13. e 5.14. Os GB localizam-se no campo referente aos granitos intra-placas nos dois diagramas, enquanto os GG situam-se no campo dos granitos de arcos vulcânicos e sin-colisionais no diagrama da Figura 5.13. Não houve caracterização definitiva no diagrama da Figura 5.14 para os GG. Este fato deve ser analisado mediante a lembrança de que o banco de dados utilizado por Pearce et al. (1984) é constituído por rochas pós-arqueanas, formadas por processos e sob condições, provavelmente, diferentes daqueles que atuaram no Arqueano (Hargraves 1976; 1981, In: Schorscher 1992).

FIGURA 5.9A - Arachnograma das amostras dos GG, normalizadas pelos valores do manto primitivo (Prim).

FIGURA 5.9 B - Arachnograma das amostras dos GB, normalizadas pelos valores do manto primitivo.

FIGURA 5.10 - Diagrama R1XR2 de La Roche et al. (1980), com as subdivisões de Batchelor & Bowden 1985, para os GB (quadrados), GG (círculos) e Gnaiss Bicas (triângulo). A maior parte das amostras situa-se no campo dos granitóides anorogênicos.

FIGURA 5.11 - Diagrama de Maniar & Piccoli (1989) onde os GB (quadrados) ocupam o campo dos granitóides relacionados a zona de "rift" (RRG) e aqueles ligados a soerguimento epirogênico continental (CEUG). A maioria dos pontos relativos às análises do GG (círculos) localizavam-se no campo dos granitóides de arco de ilha (IAG), granitóides de arco continental (CAG) e dos granitóides de colisão continental (CCG). A área menor é representativa das composições dos granitóides pós-orogênicos (POG), que melhor caracteriza os GG e os Gnaisses Bicas (triângulo).

FIGURA 5.12 - Diagrama com a mesma legenda da Figura 5.11, que confirma a classificação dos GB (quadrados) e do Gnaiss Bicas (triângulo) como granitóides anorogênicos, sendo porém, pouco discriminativo em relação aos GG (círculos).

FIGURA 5.13 - Diagrama de caracterização de ambiente geotectônico. GB (quadrados), GG (círculos) e Gnaiss Bicas (triângulo). WPG: granitóides intra-placa; VGA + Syn-Colg: granitóides orogênicos (arcos vulcânicos e sin-colisionais); ORG: granitóides de dorsal oceânica.

FIGURA 5.14 - Diagrama de caracterização de ambiência geotectônica. Os GB estão bem discriminados como anorogênicos (WPG), enquanto os GG não apresentam caracterização definitiva. A mesma legenda da Figura 5.13.

Os elementos terras raras (ETR) foram analisados para sete amostras dos GG e sete dos GB. Em ambas as suites, as curvas de distribuição destes elementos normalizados pelos condritos têm padrão similar, mostrando uma depleção dos elementos terras raras pesadas em relação aos leves (Figuras 5.15. e 5.16). Na Figura 5.15 ocorrem duas amostras que apresentam anomalia positiva para o Eu. Uma dessas amostras é a encaixante do Pegmatito Ponte da Raiz de número 4367. A outra amostra é a de número 5080 D procedente de Vila Esperança. Ambas ocorrências tiveram outra amostra analisada, que são as de números 3878 e 50801, respectivamente. Estas duas últimas amostras apresentam anomalia negativa para o európio. Anomalia positiva semelhante a esta foi também identificada em amostras de feldspatos de Tin Mountain, Black Hills, South Dakota (Walker et al. 1986), somente em amostras da zona gráfica e intermédia primária. Os autores, acima relacionados, interpretaram esta variação como sendo localizada, ocasionada por mudança na estrutura da fusão (Möeller & Muecke 1984), ou na fugacidade do oxigênio (Drake & Weil 1975). As amostras deste trabalho apresentam um substancial aumento do teor em Na_2O . O diagrama da Figura 5.16 é em tudo semelhante ao obtido por Chemale Jr. (1987) para os granitos de Itabira.

Norm: PRIM

FIGURA 5.15 - Distribuição dos elementos terras raras normalizada em manto superior primitivo (Norm: PRIM), segundo Clarpe (1991) e Taylor & McSennan (1985), das amostras da Suite Guanahães. O padrão de distribuição é heterogêneo, ocorrendo duas amostras com anomalia positiva.

Norm: PRIM

FIGURA 5.16 - Distribuição dos elementos terras raras das amostras da Suite Borrachudos. O padrão de distribuição é homogêneo paa todas as amostras.

Quando comparados os resultados analíticos das duas suites constata-se que o conteúdo total em elementos terras raras é maior nos GB, que apresentam $ETR = 530,45$, contra apenas $ETR = 261,01$ dos GG. O valor médio para o fracionamento dos ETR é muito mais nítido nos GG ($ETRL / ETRP = 14,476$) do que nos GB ($ETRL / ETRP = 9,21$). As duas suites apresentam anomalia negativa para o Eu, sendo esta anomalia mais acentuada para as rochas da Suite Borrachudos ($Eu/Eu^* = 0,04$) do que nas da Suite Guanhães ($Eu/Eu^* = 0,15$). Estes valores são compatíveis com aqueles de granitos a feldspato alcalino formados nos estágios tardios de evolução das séries granitóides (Zhonggang 1982).

A Figura 5.17. mostra os dados para os elementos terras raras das duas suites, em um mesmo diagrama, que é bastante compatível com os dados obtidos por Grossi Sad et al. 1990.

FIGURA 5.17 - Dados relativos à composição em elementos terras raras dos GB (quadrados), comparados com os GG (círculos), normalizados pelo condrito, segundo valores de Evensen (1978). A única amostra do Gnaiss Bicas está representada por um triângulo.

A única amostra dos Gnaisses Bicas analisada teve um comportamento geoquímico bastante similar às rochas da Suite Borrachudos, contudo não se pode elaborar nenhum raciocínio ou mesmo caracterização de qualquer espécie embasados

em um único dado. Reeves (1966) considerou as duas suites bastante semelhantes. Se forem mantidos os resultados analíticos desta amostra, então as similaridades deixarão de ser apenas uma suposição baseada nas análises macroscópicas e microscópicas.

5.5. CONCLUSÕES

As rochas da Suite Borrachudos estão melhor caracterizadas do ponto de vista geoquímico do que as da Suite Guanhães. Considerando os dados obtidos e discutidos neste capítulo pode-se concluir que :

- As amostras das duas suites podem ser classificadas como granitos alcalinos.
- Ambas as suites plotam no campo dos granitos anorogênicos de Batchelor & Bowden (1985).
- O modelo mais aplicado para explicar a gênese dos GB é aquele proposto por Dussin, T.(1994), baseado no trabalho de Clemens & Wall (1981), no qual estas rochas se formaram a partir de fusão crustal desenvolvida através de fase flúida com outros voláteis diferentes de água. A presença de halogênios foi detectada nas composições químicas das micas e anfibólios.
- A cristalização tardia da biotita e anfibólio implica em um magma relativamente seco. Dados experimentais mostram que a cristalização da biotita e feldspato é uma função da H_2O nos magma. Valores menores que 2% são necessários para que seja observada a sequência de cristalização (Maale & Wyllie 1975).
- A homogeneidade na composição química total entre os GB e os riolitos da mesma área , estudados por Dussin, T.(1994) indicam uma fonte única de material genético. Esta autora sugere que o material fonte destas rochas sejam rochas granitóides orogenéticas formadas durante a fase inicial do evento Transamazônico, devido ao fato destes GB apresentarem valores depletados nos elementos traços e também na composição isotópica Nd-Sr. Este ponto de vista é defendido também por Grossi Sad et al. 1990.
- As rochas da Suite Guanhães embora apresentem caráter alcalino tem sua caracterização geotectônica prejudicada devido à heterogeneidade das amostras e à grande dispersão dos dados analíticos.

6. PEGMATITOS

Historicamente as pesquisas sobre corpos pegmatíticos foram iniciadas com abordagem descritiva e voltadas principalmente para a mineralogia e estrutura de corpos individuais (Schaller 1925; Landes 1932 e 1933; Fersman 1931 e 1940). Trabalhos objetivando campanhas sistemáticas de campo, com descrição das texturas e estruturas internas dos corpos, foram desenvolvidos nos Estados Unidos, no período compreendido entre o final da década de 40 e durante os anos 50, dirigidos para o cadastramento de minerais estratégicos necessários a indústria durante a segunda guerra mundial (Cameron 1949; Heinrich 1948; Jahns 1953 a e b, 1955). No Brasil esta última etapa teve seu início no mesmo período com o mesmo enfoque, porém se prolongou durante várias décadas (Pecora & Barbosa 1945a e b; Pecora et al. 1949; Heinrich 1964; Barbosa et al. 1966).

O interregno entre os anos 50 e 70 foi marcado por um grande esforço de geólogos soviéticos em estabelecer critérios de classificação e exploração dos pegmatitos, bem como interpretações de índole genética para populações de corpos em escala regional (Beus 1960; Ginsburg 1960; Ginsburg et al. 1979; Gordienko 1971; Kuzmenko 1976; Vlasov 1952 in : Cérvy 1982a ; Varlamoff 1954, 1959 e 1978).

6.1. CADASTRAMENTO

O cadastramento dos corpos pegmatíticos executado na área desta pesquisa, foi registrado em cartas topográficas na escala 1:100.000, publicadas pelo IBGE, nas folhas de Itabira, Timóteo, Conceição do Mato Dentro, Ipatinga, Serro, Guanhanes, Rio Vermelho e São Sebastião do Maranhão. O enquadramento geológico dos maiores corpos estudados, lavras da Generosa e Ponte da Raiz foi desenvolvido por duas equipes que contaram com a participação da autora. Os corpos localizados nos municípios de Rio Piracicaba, João Monlevade e Itabira, por se encontrarem no Quadrilátero Ferrífero, tiveram suas áreas mapeadas na escala 1:25.000 (Reeves 1966; Dorr et al. 1963).

Para a descrição petrográfica dos pegmatitos, em atenção aos trabalhos publicados por Fanton et al. (1978), Correia Neves et al. (1986, 1987), Pedrosa Soares et al. (1990), dentre outros, serão empregados os critérios mineralógicos, texturais

estruturais adotados por Cameron et al. (1949), modificados no trabalho de Fanton e colaboradores.

Devido ao grande número de corpos descritos, tornou-se necessário a divisão da área de estudo em quatro faixas. A Região Norte possui pegmatitos portadores de turmalinas, o que a distingue das demais. A Tabela 6.1 retrata os dados relativos a estes pegmatitos, sendo os dois maiores as lavras de Serra Azul e do Córrego da Derrubada, esta última lavrada pela firma "Gemas do Futuro Mineração Ltda", destacando-se a água marinha como o mineral de importância econômica. A pesquisa realizada por esta firma, utilizando recursos pouco usuais na área como abertura de poços e trincheiras, possibilitou a determinação precisa dos atributos geométricos do pegmatito, tais como forma, dimensão e volumes. As outras lavras desenvolvem atividades mineradoras muito rudimentares, com túneis pequenos sem escoramento quando a encaixante é fresca e competente, e utilizando escoramento de madeira, no caso de rochas alteradas e friáveis. Em casos que tanto a encaixante como o pegmatito encontram-se alterados, a extração do berilo é realizada por desmonte hidráulico e catação manual. A maioria dos corpos em todas as quatro regiões é lavrada intermitentemente, por diferentes garimpeiros, o que dificulta a avaliação da forma e dimensão dos corpos. O Mapa 6.1 apresenta a localização dos corpos estudados.

Na Região Centro-Norte ocorre o maior corpo estudado, com grande variedade de espécies minerais que apresentam dimensões decimétricas, bastante preservadas dos processos de alteração. Esta lavra tem sido objeto de estudo por vários pesquisadores, salientando-se entre eles os trabalhos mais recentes de Wegner (1983) e Tolentino Jr. et al. (1988). Além do pegmatito da Lavra Generosa, ocorrem outros vinte e três que puderam ter seus dados registrados na Tabela 6.2 e sua localização no Mapa 6.2. Na porção nordeste desta região ocorrem alguns corpos portadores de turmalina; entretanto, a característica comum é a ausência de minerais de boro e a presença de minerais de flúor como fluorita e topázio.

A região que possui maior densidade de corpos é a Centro-Sul que já era conhecida por suas gemas desde a época dos entradistas e bandeirantes. Em Itabira, Nova Era e no distrito de Esmeralda de Ferros ocorrem minas de esmeralda e crisoberilo na variedade alexandrita. As minas Belmont em Itabira e Capoeirana em Nova Era foram temas de Dissertação de Mestrado por Souza (1988) e Machado (1994), respectivamente. Os pegmatitos das regiões Centro-Norte e Centro-Sul foram descritos quanto a mineralogia, a forma, as dimensões, as texturas e a estrutura por Marciano et al. (1991). O cadastramento de vinte e nove corpos está referido na

MAPA 6.4 - LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS PEGMATÍTICOS ESTUDADOS, REGIÃO SUL

LAVRAS

1 - Talho Aberto

2 - Pé da Serra

3 - Jacuí

4 - Veios

5 - Veio

Município	Local	Morfologia	Nº de Amostras	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural	Nº de Minerais isolados para análise	Rocha encaixante		Atitude
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Lenticular	5105	FK, QZ, Mus, Cau, Bio, Ber	5105 Mus	Há dois Túneis , desativados 21/08/91
Bambuzal	10m x 4m	Simples	11.	Gnaiss Guanhanes		
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Tabular	5106	Cau, QZ, Mus, Ber,		Desativado em 21/08/91
Coqueiro	10m x 3m	Simples	3	Gnaiss Guanhanes Alterado		Discordante
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Tabular	5104	FK, Cau, Bio, Ber, Mus, QZ, Col	5104 Ber 5104 Bio	Várias galerias , em atividade em 21/08/91
Lavra do Fundo	20m x 6m	Simples	8	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Não classificada	Não há amostra	QZ, FK, Bio, Ber		Dela foram extraídos 600 Kg de Berilo, abatida em 21/08/91
Lavra 15		Zonado		Gnaiss Guanhanes		Discordante
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Não classificada	5103	FK, Cau, Gra, OHX Mus, Qz, Ber, Col, Bio	5103 Ber	Lavra por desmonte Hidráulico
Lavra da Posse I	>100m x 3m	Zonado	8	Gnaiss Guanhanes e Talcoxisto	5103 Mus	Não classificada
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Irregular	5103	Mus, Gra, OHX, QZ, Esm, Ber, Col, FK, Cau		Desativada em 21/08/91
Lavra da Posse II	100m x 3m	Zonado	2 Min. isol.anal.	Gnaiss Guanhanes e Talcoxisto		
Conceição do Mato Dentro Fazenda Estiva	Divisa Brejaúba , Santa Rita do Rio do Peixe	Não classificada Não classificado	Não há amostra	Mus, Cau, QZ, Ber, Ap Gnaiss Guanhanes		Lavrado por desmonte hidráulico

Tabela 6.2 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Centro-Norte da área estudada. (Mus - muscovita, FK - microclina, QZ - quartzo, Amz - amazonita, Cau - caulim, Gra - granada, Mon monazita, Zr - zirconita, Xe - xenotima, Col - columbita, Ber - berilo, Esm - esmeralda, Bio - biotita, OHX - óxido de ferro e manganês, Flu - fluorita, Top - topazio, Tur - turmalina, Ab - albita, Ap - apatita).

Município	Local	Morfologia	Nº de Amostras	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural	Nº de Minerais isolados para análise	Rocha encaixante		Atitude
Conceição do Mato Dentro	Brejaúba	Lenticular	5190 a 5195	Bio, Mus, FK, Cau, QZ, Mon, Ber, Gra	5190 Mus	Duas galerias em atividade
Marilene	40m x 2,5m	Zonado	8	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Conceição do Mato Dentro	Santa Rita do Rio do Peixe	Irregular	5196 a 5211	FK, Cau, Ber, QZ, Ab, Mus	5196 Mus	Patamares em vários níveis
Cafezeiro	>100m x 20m	Zonado	35	Gnaiss Guanhanes		
Ferros	Cidade de Ferros	Não classificada	5158 a 5160	Mus, Cau, Ber, QZ	5159 Ber	Desativada
Olimpinho		Não classificado	7	Gnaiss Guanhanes		Não classificada
Ferros	Borba Gato	Tabular	5108 a 5110 5137,5163,5164	FK, Bio, Cau, Gra, Ber, OHX, QZ	5108 Mus 5109 Ber 5109 Bio	Caixa americana e três galerias
Taboca I		Zonado	11	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Ferros	Borba Gato	Veio	5107	FK, Bio, QZ,	5107 FK	Discordante
Taboca II	<5m x 1m	Não zonado	3	Gnaiss Guanhanes		
Ferros	Br 120 a 10 Km a N do trevo de Ferros	Aluvião	5128	Col, Mus, QZ, Cau, FK		Material solto e alterado
Talude estrada	<10m	Não classificado	4	Gnaiss Guanhanes		
Ferros	Santa Rita do Rio do Peixe	Não classificada	5179 a 5182	Mus, QZ, Cau, FK, OHX		2 túneis fechados
Amélio Rodrigues	<5m x 1m	Não classificado	11	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Ferros	Fazenda Sr. Saulo	Não classificada	5093 a 5183	Mus, FK, QZ, Ber, Bio	5183 Ber	Lavra retrabalhada
Lavra Celso	Não mensurável	Não classificado	8	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Ferros	Fazenda Sr. Saulo	Não classificada	5184	Mus, FK, QZ, Ber, Bio		Lavra retrabalhada
Lavra Waldomiro	Não mensurável	Não classificado	2	Gnaiss Guanhanes		Discordante

Tabela 6.2 - Continuação

Município	Local	Morfologia	Nº de Amostras	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural	Nº de Minerais isolados para análise	Rocha encaixante		Atitude
Ferros Talude da Br 120	Rodovia Ferros Guanhães	Veio Não classificado	5185 2	Tur, QZ, Cau	5185 Tur	
Ferros Talude estrada	Estrada para Guanhães 25 Km do trevo de Ferros <5m x 0,50m	Veio Não classificado	5165 e 5166 4	FK, QZ, Mus, Bio, Gra, OHX Gnaiss Guanhães	5080 Amz	Pedreira para construção de estrada Não avaliada
Ferros Santa Rita do Rio do Peixe	Sr.Jozias 6m x 2,4m	Lenticular Zonado	5171 e 5178 19	Ber, FK, Bio, Ab, Cau, QZ Gnaiss Guanhães	5171 Ber	Túnel sob a Ponte de madeira Discordante
Dores de Guanhães Silivano I	Fazenda do José Geraldo >100m x 4m	Tabular Zonado	5094 3	Ber, Bio, Mus, FK, QZ, Cau, Ab, OHX, Col Gnaiss Guanhães		Paralisado Discordante
Dores de Guanhães Silivano II	Fazenda do José Geraldo 30m x 2m	Tabular Zonado	5129 e 5130 12	Ber, Bio, Mus, FK, QZ, Cau, Ab, OHX, Col Gnaiss Guanhães	5129 Bis	Galeria em atividade Discordante
Dores de Guanhães Silivano III	Fazenda do José Geraldo >20m x 2m	Tabular Zonado	5131 e 5132 8	Cau, QZ, FK, Mus, OHX, Ab, Col, Bio, Ber Gnaiss Guanhães	5131 Ber 5131 Mus 5132 Top	Galeria Discordante
Dores de Guanhães Silivano IV	Fazenda José Geraldo >30m x 1,5m	Tabular Zonado	5121 a 5123 15	Cau, QZ, FK, Mus, Col, Ab, OHX, Bio, Ber Gnaiss Guanhães	5121 Mus	Várias galerias Discordante
Sabinópolis Lavra Generosa	Quilombo >200m x 6m	Lenticular Zonado	4437 a 4493 4540 a 4616 4746 a 4753 4836 a 4843 4863 a 4866 e 5158 213	FK, Mus, Ber, Bis, QZ, Mon, Flu, Col, OHX, Top, Gra Gnaiss Guanhães e Granitos Borrachudos	4608 Mus, 4571 Mus, 4748 Ber, 4841 Ber, 4484 Ab, 4473 Ab, 4490 FK, 4590 FK, 4596 Mus, 5157 Mon, 4614 Ber, Gen x Ber, 4752 Flu, 4753 B-F, 4753 C-F	Maior corpo da área Discordante
Ferros Talude da Br 120	Rodovia Ferros Guanhães	Veio Não classificado	5185 2	Tur, QZ, Cau	5185 Tur	

Tabela 6.2 - Continuação.

- 1- Bambuzal
- 2- Coqueiro
- 3- Fundo
- 4- Brejaúba
- 5- Posses I
- 6- Posses II
- 7- Fazenda Estiva
- 8- Marilene
- 9- Cafezeiro
- 10- Olimpino
- 11- Taboca I
- 12- Taboca II
- 13- Talude da Estrada 1
- 14- Amélio
- 14'- Rodrigues
- 15- Sr. Celso
- 16- Sr. Waldomiro
- 17- Talude com Turmalina
- 18- Vila Esperança
- 19- Silivano 1
- 20- Silivano 2
- 21- Silivano 3
- 22- Silivano 4
- 23- Generosa
- 24- Sr. Josias
- 25- Córrego do Feijão
- 26- Cheira Pau

2 0 2 4 6
k m

MAPA 6.2 - LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS PEGMATÍTICOS ESTUDADOS, REGIÃO CENTRO-NORTE

Tabela 6.3. e a localização no Mapa 6.3. As água-marinhas procedentes destas lavras são tidas como aquelas de melhor qualidade, devido a intensidade da cor azul, dentre as de origem brasileira (Drumond 1984).

A Região Sul é aquela cujos pegmatitos encontram-se descritos desde o início deste século, sendo de importância histórica. A Lavra do Talho Aberto é conhecida por seus lindos cristais euédricos de fenacita; entretanto, acha-se paralizada há muitos anos, sem nenhum valor econômico. As Fotografias 6.1. e 6.2. são exemplares de fenacita pertencentes aos acervos do Museu de História Natural da UFMG e do Museu da cidade de Curvelo, respectivamente. Pode-se observar a importância da ocorrência pois estes cristais alcançam dimensões entre 5 e 10cm de diâmetro. O pegmatito Pé da Serra foi totalmente exaurido pela comercialização do caulim e do quartzo com qualidade para emprego em eletrônica. Os outros corpos são venulares e pequenos, apresentando intenso processo de alteração e também sem nenhum valor econômico. A Tabela 6.4. e o Mapa 6.4 apresentam os dados destas cinco ocorrências.

6.2. RELAÇÕES DE CONTATO ENTRE OS PEGMATITOS E OS GNAISSES

Dos pegmatitos cadastrados 98,5% estão encaixados em Gnaisses Guanhães, enquanto 1,5% no ortogneisse denominado por Dorr de Granito Borrachudos.

As relações de contato, provocadas pela penetração do material pegmatítico nas encaixantes, apresentam-se com feições diferentes nas quatro regiões da área de tese. Na Região Norte há uma turmalinização, geralmente fina, que associada a quartzo, muscovita, biotita e feldspato constituem litotipo característico. Nas regiões Centro-Norte, Centro-Sul e Sul as feições metassomáticas mais comuns são feldspatização (Fotografias 6.3 a e b.) e muscovitização. Nesta última constata-se a disposição de livros de muscovita, bem cristalizados, muitas vezes com os planos (001) perpendiculares ao contato ou disseminados sem qualquer orientação cristalográfica. As rochas encaixantes sendo graníticas, o posicionamento dos corpos pegmatíticos se dá, geralmente de forma discordante, podendo ocorrer aqueles que apresentam atitudes concordantes e discordantes, ao mesmo tempo, devido ao fato de estarem preenchendo fraturas nestas rochas. As atitudes observadas coincidem com as descritas por Cameron et al. (1949), para rochas granito-gnáissicas.

Município	Local	Morfologia	Nº de amostras	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural	Nº de Minerais isolados para análise	Rocha encaixante		Atitude
Santa Maria de Itabira	Fazenda Morro Escuro	Tabular	5003 a 5007	FK,Mus,Cau,Bio,QZ, Ab,Gra,Ber	5005 Mus	Abertura de três túneis
Morro Escuro 3	<5m x 2m	Zonado	16	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Santa Maria de Itabira	Fazenda Morro Escuro	Tabular	5008 e 5009	QZ,FK,Mus,Ber,Ab,Gra,Col,OHX	5064 Ber	Túnel com Gnaiss alterado
Morro Escuro 5	10m x 1,5m	Zonado	5061 a 5064	Gnaiss Guanhanes	5061 FK	Concordante
Santa Maria de Itabira	Fazenda Hipólito	Não classificada	5060	Mus,FK,Cau,QZ,Ber,Bio		Desmorte Hidráulico
Morro Escuro 6	10m x não avaliada	Zonado	8	Gnaiss Guanhanes		
Santa Maria de Itabira	Fazenda Morro Escuro	Não classificada	5065 a 5069	Mus,QZ,FK,Cau,Col,Ber,	5065 Mus	Amostras doadas pelo
Vários corpos		Não classificado	5095 a 5097	Gnaiss Guanhanes	5095 Mon	Senhor Bartolomeu
			17		Top ME	
Santa Maria de Itabira	Fazenda Morro Escuro	Irregular	5098 a 5102	QZ,Ber,Gra,Cau,Top,		
Morro Escuro 4	Não avaliada	Zonado	24	Gnaiss Guanhanes		Discordante
Santa Maria de Itabira	Fazenda do Ivalde	Tabular	5111 a 5120	FK,Mus,Gra,QZ,Bio, Ab,Ber,OHX, Col, Cau,Top,	5117 Bio	Há dois túneis
Barra da Cachoeira	6m x 3m	Zonado	39	Gnaiss Guanhanes	5114 Ber	
Santa Maria de Itabira	Fazenda Bolivar	Lenticular	Não amostrado	Ber,Mus,Bio,FK,QZ,Gra,Col,Mon	5112 Mus	Discordante
Bolivar		Zonado				Desativada
Santa Maria de Itabira	Cuité	Lenticular	Não amostrado	QZ,FK,Bio, Ber,Mus,OHX		Não determinada
Cuité		Zonado		Gnaiss Guanhanes		Berilo azul intenso
Santa Maria de Itabira	Cuité	Veio	Não amostrado	QZ,FK,Mus,Bio,Ber		
Cuité	4m x 2m	Simples		Gnaiss Guanhanes		Discordante

Tabela 6.3 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Centro-Sul da área estudada. (Mus - muscovita, FK - microclina, QZ - quartzo, Gra - granada, Cau - caulim, Ber - berilo, Ab - albita, Col - columbita, Top - topázio, Bio - biotita, Mon - monazita, OHX - óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, Flu - fluorita, Esm - esmeralda, Alx - alexandrita, Cri - crisoberilo).

Município	Local	Morfologia	Nº de amostras Nº de Minerais isolados para análise	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural		Rocha encaixante		Atitude
Santa Maria de Itabira	Rio do Tanque	Tabular	3876 a 3886 4314 a 4377 4854 a 4862	QZ, FK, Mus, Mon, Col, Bio, Flu, Ber, Gra, OHX, Cau, Ab, Top	4348 FK, 4370 FK Ber-Pr, 4340 FK, 4321 Ber, 4882 Flu, 4857 Ber, 5188 Top	
Ponte da Raiz	50m x 5m	Zonado	172 Min. isol. anal			Discordante
Santa Maria de Itabira		Não classificada	5189	Ber, Mus, QZ, Bio	5189 Ber	Ofertada por um aluno
Cedro		Não classificado	1			
Santa Maria de Itabira	Córrego do Jatobá	Não classificada	Não amostrado	Ber, QZ, FK, Mus, OHX, Bio,		Abatido
Jatobá		Não classificado		Gnaiss Guanhanhes		
Ferros	Distrito Esmeralda de Ferros	Tabular	5124 a 5126	Mus, QZ, Cau, Ber, FK	5125 Mus	Duas galerias
Arruda	15m x 2,5m	Zonado	6	Gnaiss Guanhanhes		Discordante
Ferros	Córrego da Boa Vista	Tabular	5010 a 5044	QZ, FK, Ab, Mus, Gra, Bio, Ber, Col, Cau	5043 Bio	Amostragem segundo perfil, galeria
Lavra Salto 1	41,5 x 10m	Zonado	57	Gnaiss Guanhanhes		Discordante
Ferros	Córrego da Boa Vista	Lenticular	5045 a 5047	QZ, FK, Ab, Mus, Gra, Bio, Ber, Col, Cau	5045 Bio 5046 Ber	Apresenta várias galerias
Lavra Salto 2	24m x 5m	Zonado	6	Gnaiss Guanhanhes		Discordantes
Ferros	Córrego da Boa Vista	Tabular	5048 a 5055	Mus, QZ, Ab, Cau, OHX	5055 Bio	
Lavra Salto 3	>50m x 10m	Zonado	18	Gnaiss Guanhanhes		Discordante
Ferros	Córrego da Boa Vista	Tabular	5056 a 5059	FK, QZ, Mus, Bio, Ab, Ber, Col, Gra		
Lavra Salto 4	Não pode ser medido	Zonado	12	Gnaiss Guanhanhes		Concordante
Ferros	Esmeralda de Ferros	Não classificado	Não há amostra	Ber, Cri		Não determinada
Fazenda Bom Sossego	20m x 3m	Zonado		Gnaiss Guanhanhes		
Ferros	Esmeralda de Ferros	Veio	Não há amostra	Esm, QZ, Bio, Mus, Gra, Col, Ber, FK, Mon		Caixa americana
Fazenda Bom Sossego	>50m	Simplex		Micaxisto Gnaiss Guanhanhes		Concordante

Tabela 6.3 - Continuação

Município	Local	Morfologia	Nº de amostras Nº de Minerais iso- lados para análise	Mineralogia	Fases submetidas à análises quantitativas	Observações
Nome do Pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural		Rocha encaixante		Atitude
Ferros Lavra Vasco I	Fazenda Cruzeiro do Sul 10m x 2m	Não classificada Não zonado	Não há amostra	Cau,Ber Gnaiss Guanhanes		Desativada Não determinada
Ferros Lavra Vasco II	Fazenda Cruzeiro do Sul 10m x 2m	Não classificada Não classificado	Não há amostra	Ber,Cau Gnaiss Guanhanes		Desativada Não determinada
Ferros Lavra Vasco III	Fazenda Cruzeiro do Sul 10m x 2m	Não classificada Não classificado	Não há amostra	Ber Gnaiss Guanhanes		Desativada Não determinada
Ferros Matinha	Fazenda Jambreiro 5m x 2m	Não classificado	Não há amostras	Cau,Bio,Ber Gnaiss Guanhanes		Desativada Não determinado
Ferros Cachoeira do Salto	Fazenda José Viana 30m x 4m	Lenticular Simples	Não há amostra	Ber,Cau Gnaiss Guanhanes		Desativada Concordante
Ferros Fazenda do Peão	Distrito de Esmeralda dos Ferros	Não classificada Não classificado	Não há amostra	Ber Gnaiss Guanhanes		Discordante
Ferros Fazenda Providência	Distrito de Esmeralda dos Ferros	Não classificada Não classificado	Não há amostra	Ber Gnaiss Guanhanes		
Ferros Tabuões	<5m x 1m	Veio Não zonado	Não há amostra	Ber,QZ,Mus,Bio,Gra, Mon,OHX Gnaiss Guanhanes		
Itabira Belmont	Oliveira Castro 150m x 100	Veio Não zonado	Não há amostra	Esm,QZ,FK,Alx,Mus Biotitos Granitos Borrachudos		Dissertação Souza,1988 Discordante
Nova Era Capoeirana	Métricos	Veio Zonado	Não há amostra	Esm,QZ,FK,Mus,Alx metaultramáfica GB e/ou MGF		Dissertação Machado,1994
Ferros Ribeiro de Pedras	Distrito Esmeralda de Ferros >100m x 6m	Irregular Zonado	Não há amostra	QZ,Mus,Gra Gnaiss Guanhanes		Desativada Não determinada

Tabela 6.2 - Continuação

Fotografia 6.1 - Cristal de Fenacita coletado no Pegmatito do Talho Aberto em Rio Piracicaba, MG. Exemplar pertencente ao Museu de História Natural da UFMG.

Fotografia 6.2 - Cristal de Fenacita oriundo do Pegmatito do Talho Aberto em Rio Piracicaba, MG. Exemplar pertencente ao Museu Municipal de Curvelo, MG.

Município	Local	Morfologia	Nº de Amostras	Mineralogia	Fases submetidas a análises quantitativas	Observações
Nome do pegmatito	Dimensões	Tipo Estrutural	Nº de minerais isolados para análise	Rocha encaixante		Atitude
Rio Piracicaba	Talho Aberto	Irregular	4378 a 4383 4867 a 4895 4911 a 4921	Mus, FK, QZ, Ab, Cau, Flu, Gra, Mon, Zr, Xe, Col, Py, Fen, OHX, Amz	4918 Mus, 4868 FK, 4912 FK, 4871 FK, 4890 FK, 4893 FK, 1917 FK, 4870 FK, 4867 FK, 4880 Ab, 4891 Ab, 4872 FK, 4869 Mus, 4874 FK, 4920 FK, 4867 Ab	Amostra de Fenacita de duas Coleções
Talho Aberto	20m x 10m	Zonado	68	Gnaiss Bicas		Discordante
Rio Piracicaba	Fazenda Pé da Serra	Irregular	4844 a 4852 5070 a 5075	Mus, QZ, Cau, Col, Ber, OHX	5071 Ber, 4846 Ber, 5073 Mus, 4847 Mus, 4848 Col	Mina exaurida. Datação K/Ar Amostra 4847 Mus Discordante
Pé da Serra	25m x 4m	Zonado	21	Gnaiss Bicas		
João Monlevade	Jacuí	Não definida	4932 a 4938	Cau, QZ, Mus, OHX	4932 Mus	
Jacuí	<5m x 2m	Zonado	16			
Rio Piracicaba	Estrada de Ferro abaixo do viaduto	Não definida	4939	Cau, QZ, Mus, OHX		Corte na Estrada
Veios pegmatíticos	<5m x 2m	Não definido	4			Discordante
Rio Piracicaba	Trevo da rodovia BR 262	Não definida	4940 a 4941	Cau, QZ, Mus, OHX		Corte na Estrada
Veios pegmatíticos	<5m x 2m	Não definido	7			Discordante

Tabela 6.4 - Ficha cadastral dos pegmatitos da Região Sul da área estudada. (Mus - muscovita, FK - microclina, QZ - quartzo, Amz - amazonita, Cau - caulim, Flu - fluorita, Gra - granada, Mon - monazita, Zr - zirconita, Xe - xenotina, Col - columbita, Py - pirita, Fe - fenacita, Ber - berilo, OHX - óxidos de ferro e manganês).

MAPA 6.1 - LOCALIZAÇÃO DOS CORPOS PEGMATÍTICOS ESTUDADOS, REGIÃO NORTE

Fotografias 6.3 - Pegmatito da Generosa, em Sabinópolis, MG. A- Entrada da galeria principal da lavra. No canto superior esquerdo da fotografia pode-se observar a região de contato do corpo pegmatítico com a rocha encaixante. B- Em destaque as feições metassomáticas de feldspatização visíveis na fotografia anterior.

6.3. DIMENSÃO E FORMA

A grande maioria dos corpos (67,7%) cadastrados apresenta espessura entre 0,5m e 5m, sendo portanto classificados quanto a esta característica de pequenos. Entre os que apresentam espessura entre 5,0m e 15m estão quinze pegmatitos, perfazendo 23,1% do total. Somente 9,2% têm espessuras pouco maiores que 15m.

As formas observadas e suas frequências incluem tabular com 46,5% dos corpos, lenticular (21,5%), venular (18,2%) e irregular (13,8%). Dezenove corpos não tiveram suas formas definidas, equivalendo assim a 29,2% do total. A pouca precisão na definição da morfologia é decorrente de vários fatores como falta de exposição do pegmatito, cobertura vegetal intensa, processo de lavra sem utilização de recursos técnicos corretos, corpos sendo explorados em vários períodos intermitentes promovendo modificações na área devido a utilização de máquinas pesadas para limpeza e reinício de atividades. As Fotografias 6.4 e 6.5 evidenciam os aspectos decorrentes dos processos de lavra em dois dos corpos maiores, que têm sido trabalhados de forma contínua. Recentemente, esta atividade sendo desenvolvida sem recursos técnicos necessários, acarretou o abatimento do pegmatito da Generosa.

6.4 ESTRUTURA INTERNA

As classificações propostas para identificar as estruturas internas dos corpos pegmatíticos foram sintetizadas nos trabalhos de Cerný (1986) ao descrever os Distritos Pegmatíticos do Colorado. Esta classificação simplificada denomina de: a)- *pegmatitos simples* aos corpos que não apresentam camadas internas diferenciadas na mineralogia e textura dos seus constituintes, b)- *pegmatitos zonados simples*, aqueles que apresentam estrutura com camadas distintas segundo os atributos mineralógicos texturais. Esse segundo tipo, contém poucas unidades de substituição caracterizadas por espécies minerais com baixo conteúdo em Ta, Sn e álcalis raros. Finalmente o grupo c)- *pegmatitos zonados complexos*, que apresentam as zonas características bem individualizadas e abundantes unidades de substituição, formadas por minerais enriquecidos em Ta, Sn e álcalis raros.

Os pegmatitos do Distrito de Santa Maria de Itabira se enquadram em dois dos tipos mencionados acima: 1. pegmatitos simples (Ps) e 2. pegmatitos zonados simples (Pzs).

Fotografia 6.4 - Aspectos decorrentes do processo de lavra observado no Pegmatito do Silivano. Galerias abertas utilizando picaretas e pás, devido ao alto grau de alteração da rocha encaixante e do corpo pegmatítico

Fotografia 6.5 - Pegmatito da Posse lavrado pelo processo de desmonte hidráulico. Observa-se peneiras de separação para catação manual do berilo na variedade água marinha

6.4.1. Pegmatitos Simples

Foram assim classificados os corpos que estavam em início de processo de lavra, ou onde a extração mineral se encontrava paralizada com ou sem túneis e galéias, que mostravam mineralogia pouco diversificada sem variação na textura. As lavras da Taboca II, Fundo, Sr. Olímpio, Jacuí e veios pegmatíticos da Região Sul são exemplos deste tipo. A mineralogia constitui-se de feldspato potássico, quartzo, muscovita em livros de 3 a 4cm no máximo, biotita, pouca quantidade de albita e raras vezes cristais de berilo e columbita. Não há variação nas dimensões dos grãos.

6.4.2. Pegmatitos Zonados Simples

Neste tipo se enquadra a maioria dos corpos estudados, sendo observados neles, zonas com cotatos gradacionais porém bem nítidas. A espessura destas zonas sempre ultrapassa de 1 metro. A zona marginal ou de contato é pouco característica e em muitos corpos não foi individualizada. A zona mural ou gráfica é a mais desenvolvida nos pegmatitos estudados, enquanto a zona intermédia só se destaca nos maiores. Em um grande número destes corpos não foi possível observar o núcleo. Este fato, entretanto, não é indicativo de que o pegmatito não possua núcleo, uma vez que o trabalho do garimpeiro é conduzido no sentido de evitar essa zona, sabidamente estéril nos minerais de interesse econômico. Passa-se a seguir a descrição de cada uma dessas zonas.

6.4.2.1. Zona Marginal

Geralmente de pouca espessura, variando de 5 a 20cm no máximo. Os feldspatos formados nessa zona são potássicos ou sódicos e seus cristais com poucos centímetros, anédricos ou subédricos. A biotita é o mineral que ocorre, preferencialmente, nesta zona. Muscovitas mostram os eixos cristalográficos c paralelos ao contato, como nas lavras do Talho Aberto, da Generosa, Barra da Cachoeira e Santa Rita do Rio do Peixe, ou em cristais euédricos sem orientação nas demais lavras. Na Região Norte além dos minerais descritos anteriormente ocorre ainda turmalina (schorlita) em cristais prismáticos orientados perpendicularmente em relação ao contato. Na lavra da Generosa ocorre ainda pequenos cristais de fluorita.

6.4.2.2. Zona Mural ou Gráfica

É a de maior frequência nos pegmatitos desta área sendo a mais desenvolvida em quase todos os corpos, chegando a alcançar 3/4 da dimensão do corpo. A textura varia de muito fina a média, podendo alcançar em alguns corpos dimensões maiores a nível de afloramento. Não há uma transição brusca entre as zonas que antecedem e sucedem a esta, ocorrendo uma gradação crescente na

textura desde a zona marginal até a intermédia. Além do feldspato potássico e quartzo intercrescidos ocorre ainda biotita e muscovita em livros com poucos centímetros, granadas em cristais euédricos e, muito raramente berilos e columbitas.

O pegmatito da Generosa não apresenta zona gráfica, havendo uma passagem brusca da zona marginal para a zona intermédia. Este foi o único corpo onde houve este lapso na cristalização.

6.4.2.3. Zona Intermédia

Nela são encontrados grandes cristais de feldspato e quartzo, predominantemente. Nas lavras Ponte da Raiz, Morro Escuro, Silivano e Barra da Cachoeira os prismas de feldspato potássico alcançam 50cm, mostrando formas euédricas. Nos pegmatitos do Talho Aberto, Morro Escuro, Ponte da Raiz, Taboca I, Taboca II e Generosa, parte do feldspato potássico está amazonitizado, ocorrendo ainda cristais de um verde muito intenso, bastante procurados para a produção de objetos de adorno. Outros minerais comuns nesta zona são monazita, columbita, berilo e muscovita em livros decimétricos. Na Lavra da Generosa, a quantidade de muscovita é surpreendente, e seus cristais mostram hábito do tipo rabo-de-peixe.

6.4.2.4. Núcleo

Nos sistemas pegmatíticos, a porção central dos corpos é ocupada, geralmente, por massa anédrica de quartzo, que pode estar acompanhada, por cristais subédricos a euédricos de microclina pertitizada, bem desenvolvidos. Nos corpos pequenos, em sua totalidade, o núcleo não foi observado pois, a área exposta do corpo pegmatítico não oferecia esta possibilidade, devido muitas vezes, à paralização do processo de lavra das galerias anteriormente abertas. Outros motivos podem ser salientados como, trabalho de lavra em fase inicial, galeria aberta paralela ao contato o que permite a visualização de uma única zona, ou finalmente a existência de um núcleo constituído por outras assembléias minerais.

Na Região Sul, a Lavra do Talho Aberto apresenta núcleo constituído por quartzo enfumaçado rodeado por cristais euédricos ou subédricos de amazonita, e ainda microclina bege e muscovita. Na Lavra Pé da Serra, após a retirada da muscovita e do caulim, constatou-se a presença de uma alongada massa anédrica de quartzo branco leitoso com 30 a 40 metros de extensão, que corresponderia ao núcleo.

Na Região Centro-Sul as lavras do Morro Escuro 1,2,3 apresentam núcleo de quartzo enfumaçado e leitoso. Na Lavra Ponte da Raiz, a parede do fundo é formada por um cristal de quartzo de 4,5 m por 2,0 m envolvido por massa de pegmatito gráfico e grandes livros de muscovita e cristais de feldspatos potássicos

pertitizados. Na Lavra Barra da Cachoeira foram extraídas várias toneladas de quartzo hialino pela firma Lithos. Como não houve uma etapa de cartografia anterior ao processo de exploração, perderam-se os dados relativos à posição, forma e dimensão dessa massa de quartzo, que provavelmente era o núcleo do pegmatito.

Na Região Centro-Norte, a Lavra da Generosa mostra um núcleo de quartzo branco leitoso, contendo na porção superior dele grandes livros decimétricos de muscovita, massas anédricas de nióbio-tantalos envolvidos por albita e bolsões de cristais gigantes de fluorita. A extensão do núcleo não pode ser avaliada devido ao fato de seu aparecimento ocorrer em uma etapa de alargamento de uma galeria antiga, que se transformou na principal entrada da mina (Fotografia 6.3.a), dando acesso a um amplo salão, em cuja parede ocidental aflora o quartzo, em uma extensão de uns 15m por 4 a 5m de altura. As outras lavras desta região não apresentam esta zona exposta de forma expressiva, que pudesse ser identificada com segurança.

Entre as lavras da Região Norte, somente na de Santo Antônio de Itambé foi identificado um núcleo constituído por quartzo leitoso e hialino.

6.4.2.5. Corpos de substituição

São pouco abundantes, constituídos principalmente por albita, frequentemente na variedade cleavelandita, muscovita, berilo, nióbio-tantalatos, fluorita e topázio, principalmente nas lavras das regiões Centro-Norte e Centro-Sul. Na Lavra do Talho Aberto, os corpos de substituição são constituídos por granadas e fenacita em cristais transparentes e leitosos.

O principal mineral secundário encontrado nestes corpos é o caulim. Porém minerais como bismutita, wulfenita, hidróxidos de ferro e manganês são também de ocorrência comum.

6.5. CONCLUSÕES

- Foram cadastrados na área 68 corpos pegmatíticos dos quais 48 deles foram amostrados, correspondendo assim a 70,6% do total. Sendo a região de topografia muito acidentada, e como o mapeamento geológico não foi contemplado entre os objetivos desta tese, a localização destes corpos e outros existentes está relacionada a indicações através dos habitantes locais.
- As relações de contato mais comuns provocadas pelos pegmatitos nos diferentes litotipos que se constituem as encaixantes são: turmalinização,

nos corpos da Região Norte; feldspatização e muscovitização nos pegmatitos das demais zonas.

- O posicionamento dos pegmatitos nas encaixantes se dá através de fraturas, geralmente com atitude discordante.
- Quanto à dimensão, 67,7% dos corpos são pequenos, 23,1% são médios e apenas 9,2% são grandes.
- Não houve possibilidade de identificação da estrutura interna em 29,4% dos corpos cadastrados. Dentre os pegmatitos que apresentam espessura maior do que 0,5m, 75% são zonados simples e 25% são simples
- As zonas marginal, mural e intermédia foram identificadas em todos os corpos, com exceção da Lavra da Generosa que não apresenta zona mural. O núcleo foi observado em alguns pegmatitos, sendo constituído por quartzo e feldspato potássico. Os corpos de substituição são raros com mineralogia muito simples.
- A característica mineralógica dos pegmatitos da Região Norte é representada pela presença de espécies contendo boro (schorlita) e ausência de minerais ricos em flúor. Nas demais regiões as presenças de fluorita e topázio se fazem notar em todos os corpos, e não há ocorrência de aluminosilicatos de boro. A fenacita é um mineral cuja presença em corpos pegmatitos de Rio Piracicaba é internacionalmente conhecida. Exemplares deste mineral foram estudados por diversos pesquisadores e são encontrados em várias coleções no Brasil e no mundo. Os nióbio-tantalatos constituem o grupo mineral mais conspicuo desta área depois do berilo. A localidade de Santa Rita no município de Sabinópolis teve seu nome mudado para Euxenita devido a presença constante de minerais desta série nos pegmatitos. A amazonita, variedade verde de microclina, é notável nos corpos desta área.

7. GEOCRONOLOGIA

O termo província aplicado aos pegmatitos no trabalho de Cerný (1982a), adotado de Ginsburg et al. (1979), foi definido como sendo "o total dos campos pegmatíticos (ou faixas) dentro de uma única província metalogenética". Este último conceito envolve o fator temporal, o que determinou a realização de análises de datação em minerais dos corpos estudados, com o objetivo de se conhecer a extensão da PPO proposta por Paiva (1946), que utilizou o termo província na concepção defendida atualmente por Kuzmenko et al. (1976), na qual o fator geográfico é o essencial.

O estabelecimento das relações geocronológicas existentes entre os corpos pegmatíticos e as rochas encaixantes se fazem também necessárias, para estabelecer a zoneografia dos pegmatitos com ocorrência em Minas Gerais.

Neste trabalho são referidos os dados radiométricos obtidos para os pegmatitos da região selecionada para esta tese. A correlação geocronológica que será elaborada basear-se-á em todos os dados disponíveis na literatura, tanto para os pegmatitos como para as rochas granito-gnaissicas.

7.1. DADOS GEOCRONOLÓGICOS DE PEGMATITOS DA PPO

Muitos são os dados publicados sobre datações em minerais de pegmatitos na PPO, porém não há um trabalho de síntese abordando a questão levantada no início deste capítulo.

Siga Jr. et al. (1982) apresentam trabalho sobre o padrão geológico-geocronológico de rochas de alto grau metamórfico da porção norte da Faixa da Ribeira, onde encontra-se um apêndice contendo uma centena de dados obtidos para diversos tipos de rochas. Os pegmatitos abordados estão localizados no vale do Rio Doce e nas divisas do Estado de Minas Gerais com o do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, mais ao sul da PPO. São corpos que afloram em Bicas, Manhauçú, Eugenópolis e Galiléia.

Herz (1970) pesquisando rochas ígneas do Quadrilátero Ferrífero submeteu-as a análises petrográficas, químicas e mais especificamente, geocronológicas. Nesta última atividade datou uma amazonita da quadrícula de Rio Piracicaba, pelo método Rb/Sr.

Sá (1977), em sua tese de doutoramento, analisou muscovitas de duas lavras, Cachoeira e Maxixe, do município de Araçuaí na região do vale do Rio Jequitinhonha através do método potássio-argônio.

Marciano (1985) apresenta dados referentes a uma amostra de muscovita e outra de microclína, provenientes das lavras do Ferreirinha e Olho de Gato, município de Governador Valadares. A metodologia empregada foi rubídio-estrôncio.

A síntese dos dados até agora publicados compõe a Tabela 7.1, e a localização dos minerais amostrados para uma mais fácil visualização está apresentada no mapa elaborado por Putzer (1976) (Figura 7.1).

7.2 ESCOLHA DA FASE MINERAL DATADA

Muscovita e biotita são minerais que incorporam, os elementos radiogênicos ^{87}Rb e ^{40}K , podendo ser utilizados na obtenção de dados geocronológicos. Os dados representam o tempo no qual a mica permaneceu como um sistema fechado em relação aos elementos K-Ar ou Rb-Sr.

Speer (1984), em sua síntese sobre composição isotópica de micas, demonstra através de dados de vários autores, que se faz necessária a seleção criteriosa da fase a ser analisada devido à interferência de vários fatores no dado a ser obtido, caso contrário, a eficácia da interpretação dos resultados pode ser comprometida. Os fatores discutidos no trabalho deste autor, são: temperatura de cristalização, velocidade de resfriamento, distância que a amostra selecionada foi coletada em relação ao contato, presença de água circulante que promove alteração hidrotermal atuando na estrutura das fases minerais, promovendo perda ou aquisição de elementos.

Conhecidos os fatores que interferem nas análises geocronológicas, chega-se a conclusão que a biotita seria a fase preferida, no caso dos pegmatitos, pois sua ocorrência é limitada fundamentalmente às zonas marginal e mais raramente a mural. Entretanto os cristais de biotita não foram os selecionados em virtude de se apresentarem, parcial ou totalmente, intemperizados. A muscovita foi a fase escolhida por ser encontrada em todos os corpos pegmatíticos, apresentando-se desprovida de alteração, ocorrendo na forma de cristais euédricos a subédricos, exibindo aspecto de livros, com dimensões variando de 20 a 30cm de comprimento.

TIPO DE AMOSTRA - Nº-AMOSTRA * Nº DA AMOSTRA (CPMTC)	LOCALIZAÇÃO	IDADE (M.a.)	MÉTODO DE DATAÇÃO	AUTOR
Muscovita * 2303	Governador Valadares, MG, Lavra do Ferreirinha	497±13	Rb / Sr	Marciano (1985)
Microclina * 2545	Governador Valadares, MG, Lavra do Olho de Gato	501±14	Rb / Sr	Marciano (1985)
Feldspato DTM-8	Rio Piracicaba	545	Rb / Sr	Herz (1970)
Feldspato JD 104B		512±19	Rb / Sr	Cordani & Teixeira (1979)
Muscovita RH-RP4		408±11	K / Ar	Cordani & Teixeira (1979)
Muscovita 3220	Araçuaí, MG, Lavra da Cachoeira	467±18	K / Ar	Sá (1977)
Muscovita 3232	Araçuaí, MG, Lavra do Maxixe	490±12	K / Ar	Sá (1977)
Muscovita Gov 68	Galiléia, MG - a norte da cidade	480±8	K / Ar	Cordani (1973)
Biotita 6	Serra dos Órgãos, RJ	464±25	K / Ar	Cordani et al. (1973)
Muscovita 113	Eugenópolis, Caparaó	454±23	K / Ar	Cordani et al. (1973)
Muscovita FJT-SG	Serra dos Órgãos, RJ	471±14	K / Ar	Bigazzi et al. (1971)
Feldspato 113	Eugenópolis, Caparaó	469±15	Rb / Sr	Ledent & Pasteels (1968)
Feldspato 113	Eugenópolis, Caparaó	492±15	Rb / Sr	Ledent & Pasteels (1968)
Muscovita SA-169	Manhuaçu, MG	505±15 556±16	K / Ar	Dirac & Ebert (1967)
Muscovita SA-168	Bicas, MG	511±14 583±12	K / Ar	Dirac & Ebert (1967)
Muscovita CM-9	Folha Vitória da Conquista, BA. 14°12'30"e 40°50'00"	709±20	K / Ar	Mascarenhas et al. (1989)
Muscovita AC-4N	Folha Vitória da Conquista, BA. 14°41'15"e 41°00'00"	660±37	K / Ar	Mascarenhas et al. (1989)

Tabela 7.1 - Síntese de dados geocronológicos da Província Pegmatítica Oriental.

Os critérios utilizados na distinção entre muscovita de cristalização primária daquelas oriundas de corpos de substituição, encontram-se na Tabela 7.2, retirada de Speer (1984).

Figura 7.1- Integração de dados geocronológicos referentes a minerais de pegmatitos datados na Província Pegmatítica Oriental (PPO). Os limites da província são aqueles propostos por Putzer (1976).

CARACTERÍSTICA	CRITÉRIOS
TEXTURA	Tamanho do grão comparável ao de outros minerais magmáticos. Formas euédricas ou subédricas. Formas bem determinadas. Nenhuma reação e/ou relação textural com outros minerais. Abundância na rocha. Rocha hospedeira relativamente inalterada.
OCORRÊNCIA	Grande segurança que plutons ricos em água consolidaram sob condições concordantes com campos de estabilidade determinados experimentalmente para muscovita.
QUÍMICAS	Teores mais altos em Ti e, dependendo da ocorrência individual, diferenças sistemáticas em Mg, Fe, Na, Al, Si e H ₂ O. Distribuição equilibrada entre os elementos da muscovita e de outros minerais magmáticos.
ASSEMBLÉIA MINERAL	A assembléia mineral é indicativa de um magma de composição peraluminosa coexistindo com biotita aluminosa, cordierita, granada, topázio, turmalina, entre outros.

Tabela 7.2 - Critérios utilizados por vários autores para reconhecer muscovita magmática.

7.3 DADOS OBTIDOS NESTE TRABALHO

Quatro dentre os corpos cadastrados foram selecionados, tendo suas amostras de muscovitas sido submetidas a análises geocronológicas pelo método K/Ar. Esta escolha foi feita em função das características singulares existentes nos pegmatitos, discutidas a seguir.

Dentre os corpos que ocorrem no Quadrilátero Ferrífero descritos por Reeves (1966), foi escolhido o denominado Pé da Serra, localizado na porção meridional da área de pesquisa, por estar encaixado em Gnaisses Bicas da Formação Elefante, e por conter muscovita na forma de livros espessos de 10 a 15 cm de comprimento.

No extremo norte da área, o pegmatito da Fazenda Córrego do Feijão, encaixado em paragneisses da Suíte Guanhões (Grossi Sad et al. 1990), é um dos poucos portadores de turmalina, variedade shorlita.

O corpo da Lavra da Generosa, na região de Sabinópolis e encaixado em ortogneisses da Suíte Borrachudos é o maior corpo estudado. Distingui-se por seus

cristais decimétricos de monazita, nióbio-tantalatos, berilos, fluoritas, e ainda por não apresentar zona mural.

Em Santa Maria de Itabira, a escolha recaiu sobre o pegmatito do Morro Escuro, um dos maiores corpos locais, tendo como encaixante os ortognaisses Guanhões.

A localização dos corpos pegmatíticos amostrados está registrada no mapa esquemático (Figura 7.1). As coordenadas geográficas referentes à situação dos corpos, bem como informações relativas aos padrões utilizados, percentagem em peso de K e Ar e às idades em Ma. são encontradas na Tabela 7.3.

As idades atribuídas a estas rochas variam de 502 ± 31 a 530 ± 13 Ma., o que permite relacioná-las ao Ciclo Brasileiro, evento térmico ocorrido há cerca de 500 Ma..

Nº DE ORDEM	SPK	NºCPMTC /UFMG	LITOLOGIA	MATERIAL	LOCALIZAÇÃO
1	7046	5152 Mos	Pegmatito	Muscovita	Fazenda Córrego do Feijão, Serra Azul, .
2	7075	4596 Mos	Pegmatito	Muscovita	Grota da Generosa, Sabinópolis, .
3	7045	5061 Mos	Pegmatito	Muscovita	Lavra do Morro Escuro, Santa Maria de Itabira.
4	7045	4847 Mos	Pegmatito	Muscovita	Fazenda Pé da Serra, Rio Piracicaba, .

NºDE ORDEM	COORDENADAS GEOGRÁFICAS	% K	ERRO	$Ar_{10}^{40} [6] AR D$	% Ar atm	IDADE (Ma.)	ERRO (Ma.)
1	18° 25' 30" S 43° 07' 15" W	8,4205	5,4078	188,65	5,20	502,1	30,7
2	18° 41' 15" S 43° 12' 25" W	7,7185	1,1614	184,64	6,54	529,9	13,2
3	19° 23' 50" S 43° 05' 10" W	7,9326	0,5000	185,36	10,02	519,1	10,1
4	19° 54' 50" S 43° 11' 25" W	7,9482	0,5000	188,20	13038	525,2	11,3

Tabela 7.3 - Dados geocronológicos de corpos pegmatíticos da porção centro-oeste da Província Pegmatítica Oriental.

7.4. DADOS GEOCRONOLÓGICOS DAS ROCHAS GRANITO-GNÁISSICAS

Herz (1970) em seu estudo sobre as rochas gnaissicas, obteve uma análise pelo método Rb/Sr, de um feldspato potássico oriundo do ortognaisse da Suíte Borrachudos do corpo Itabira, sem relacionar qualquer outro dado geocronológico da rocha. Análises de rocha total apareceram na literatura somente duas décadas após o trabalho deste autor, produzidas por Teixeira et al. (1990), Dossin et al. (1993) e Dussin (1994). Esses dados encontram-se sumarizados na Tabela 7.4, e relacionam esta intrusão ao Proterozóico Médio datado em 1,7Ga. através do método Pb/Pb em

Amostra	Local de ocorrência da rocha Material analisado	Razão Inicial (RI)	Idade (M.a.) Método	Interpretação do autor do dado	Referências bibliográficas
Ha-19	Santa Bárbara. Biotita do granodiorito gnaíse		810 K/Ar	Idade mínima da rocha, representando também, provavelmente, a perda de argônio	Herz(1970)
Ha-18	Cocais. Muscovita do granodiorito gnaíse		690 K/Ar		
Ha-10-f	São Gonçalo. Plúton Peti, feldspato potássico do Granito Borrachudos		1.230 Rb/Sr	Esta idade é uma boa aproximação para a intrusão granítica que tomou lugar durante a fase final da Orogenia pós Minas	Herz(1970)
Ha-10-b	São Gonçalo. Plúton Peti, biotita do Granito Borrachudos		486 K/Ar	Evento térmico que ocorreu a 500M.a. , e que causou a perda de argônio no Ciclo Brasileiro	Herz(1970)
Ha-7	Itabira. Biotita do material granito gnaissico misturado		500 K/Ar		
Ha-6-b	Itabira. Biotita do granodiorito gnaíse		460 K/Ar		
Ha-6-m	Itabira. Muscovita do granodiorito gnaíse		450 K/Ar		
	Guanhães. Neossoma, 6(seis) amostras de migmatitos com isócrona de referência		2.000 Rb/Sr	Episódio de migmatização e homogeneização isotópica no Ciclo Transamazônico	Hasui et al.(1976)
	Guanhães. Gnaíse, (rocha total)		2.672±50 Rb/Sr	Idade mínima	Müller (1976)
	Guanhães. Micas		570± Rb/Sr	História térmica superimposta relacionada ao Ciclo Brasileiro	Müller (1976)
	Guanhães. Micas		500± Rb/Sr		Müller (1976)
JD-34	Conceição do Mato Dentro. 2 (duas) frações de zircão do metariolito		1.770 U/Pb	"Idade real do zircão e portanto a da cristalização do riolito"	Brito Neves et al.(1979)
JD-35 SP JD-35 B	Conceição do Mato Dentro. Metariolito, (rocha total, isócrona)	1,5	530 Rb/Sr	"Estas idades e estas razões iniciais elevadas correspondem a uma rehomogeneização isotópica brasileira de rochas cuja idade dada pelo método U/Pb é de 1.770Ma.".	Brito Neves et al.(1979)
JD-34 B1 JD-34 02 JD-34 SP	Conceição do Mato Dentro. Metariolito, (rocha total, isócrona)	1,1	640 Rb/Sr		
PB-CI-6	Conceição do Mato Dentro. Biotita do gnaíse		457±12 K/Ar		
PB-CI-5	NE de Morro do Pilar. Biotita do gnaíse		690±19 K/Ar	Importante fase de rehomogeneização isotópica relacionada ao evento termotectônico do Ciclo Brasileiro (650-500M.a.).	Brito Neves et al.(1979)
GG-55	Leste de Santo Antônio de Itambé. Muscovita de gnaíse		433±18	Fenômenos de hidrotermalismo caracterizados como pós- tectônicos brasileiros (500-400M.a.)	
	Itamarandiba (arredores). Granito (rocha total)	0,708±	1.830± Rb/Sr	Época de processos de granitização regional e formação de plútons graníticos	Siga Jr. (1982)

Tabela 7.4 - Síntese das análises geocronológicas dos Granitos Borrachudos e Gnaíse Guanhães analisados por diversos autores, em amostras destas rochas que ocorrem na área estudada e em seus arredores.

Amostra	Local de ocorrência da rocha Material analisado	Razão Inicial (RI)	Idade (M.a.) Método	Interpretação do autor do dado	Referências bibliográficas
	Guanhães (arredores). Gnaiss, (rocha total)	0,7358±	2200± Rb/Sr	Processos de retrabalhamento do Proterozóico Inferior	Siga Jr. (1982)
52, 56, 70, 89, 91, 100	Guanhães. Biotita gnaiss, (rocha total)	0,7197±0, 0037	2.666±0,51 Rb/Sr	Isócrona constituída a partir das análises das 6 amostras citadas; interpretada como idade mínima da rocha	Lauenstein (1984) Müller et al. (1986)
	Conceição do Mato Dentro. Zircões do metamigmatito ácido com textura porfiróide		1.711±8 U/Pb intercepto superior	Idade do magmatismo ácido que ocorreu nesta região	Machado et al.(1989)
	Serro. Zircão do metamigmatito ácido, amostra mais foliada que a anterior		1.715±2 U/Pb		
	Gouveia. 3(três) frações de zircão do granitóide		2.839±14 U/Pb intercepto superior. 1.844±15 U/Pb intercepto inferior	Início da deposição das rochas do Supergrupo Espinhaço. Idade do metamorfismo das unidades pré-Espinhaço	Machado et al.(1989)
	Senhora do Porto. Zircão e titanita do migmatito		512±5 U/Pb	Estimativa inicial para a idade da deformação que afetou as rochas do Supergrupo São Francisco e unidades mais antigas	Machado et al.(1989)
IDGU-4	Cabeceira do Córrego do Mosquito. Plúton São Félix, gnaiss, (rocha total)	0,7250±0, 0013	1.438±67 Rb/Sr	Reequilíbrio do sistema isotópico Rb/Sr devido ao metamorfismo da seqüência paraderivada	Teixeira et al.(1990)
IDGU-6	Faz. do Córrego da Lagoa, Guanhães. Leucossoma de gnaiss migmatizado	0,7863±0, 0017	752±116 Rb/Sr	Época de migmatização do Proterozóico Superior sobre a seqüência paraderivada	Teixeira et al.(1990)
IDGU-10	Santa Maria de Itabira. Migmatito, (rocha total)	0,7220±0, 0647	2.652±199 Rb/Sr	Época de migmatização ocorrida no Arqueano	Teixeira et al.(1990)
IDGU-11	Santo Antônio do Rio Abaixo. Gnaiss, (rocha total)	0,7180±0, 0010	1917±102 Rb/Sr	Ratificação da importância do Ciclo Transamazônico nos processos de retrabalhamento crustal.	Teixeira et al.(1990)
IDGU-7	Cabeceira do Córrego da Lagoa, Guanhães. Plúton Urubu. Granitos que mostram contatos difuso- transicional com os gnaisses anteriores, (rocha total)	0,70 erro analítico elevado	2.141±177 Rb/Sr	Rocha do Proterozóico Inferior, cujo metamorfismo foi pouco posterior à colocação na crosta	Teixeira et al.(1990)
	Sabinópolis. Plúton São Félix, zircões		1.729±12 Pb/Pb	Magmatismo ácido que originou as rochas da Suite Borrachudos	Dossin et al.(1993)
	Sabinópolis. Plúton São Félix, biotita		482±5,8 K/Ar	Evento térmico ligado ao Ciclo Brasiliano que afetou estas rochas	Dossin et al.(1993)

Tabela 7.4 - Síntese das análises geocronológicas dos Granitos Borrachudos e Gnaisses Guanhões analisados por diversos autores, em amostras destas rochas que ocorrem na área estudada e em seus arredores (continuação).

Amostra	Local de ocorrência da rocha Material analisado	Razão Inicial (RI)	Idade (M.a.) Método	Interpretação do autor do dado	Referências bibliográficas
	Guanhães. Plúton Urubú, biotita		485,8±7,6 K/Ar	Evento térmico ligado ao Ciclo Brasiliano que afetou estas rochas	Dossin et al. (1993)
	Santa Maria de Itabira. Plúton Itauninha, biotita		475,4±6,4 K/Ar		
	Santa Maria de Itabira. Plúton Itauninha, zircões		1.600 Pb/Pb	Magmatismo ácido que originou as rochas da Suíte Borrachudos	Dussin (1994)

Tabela 7.4. Síntese das análises geocronológicas dos Granitos Borrachudos e Gnaisses Guanhões analisados por diversos autores, em amostras destas rochas que ocorrem na área estudada e em seus arredores (continuação).

monocristal de zircão. As idades do intervalo 462 a 485 Ma. referem-se ao retrabalhamento ocorrido no Ciclo Brasiliano, com homogeneização isotópica para K/Ar em biotitas.

As análises geocronológicas realizadas em gnaisses da Suíte Guanhões não são tão significativas do ponto de vista da abrangência de todos os litotipos encaixantes dos pegmatitos da região focalizada por esta tese, devido à inexistência de cartografia geológica em escala compatível com estudos petrográficos de detalhe, que possibilitem uma interpretação criteriosa dos dados. As datações destas rochas se devem a Siga Jr. (1982), Lauenstein (1984), Müller et al. (1986) e Teixeira et al. (1990) e apresentam uma considerável dispersão de valores (Tabela 7.4). A maior parte dos corpos amostrados está encaixada em ortognaisses da Suíte Guanhões.

Os dados estruturais apresentados por Chemale Jr. (1987) chamam atenção para três deformações plásticas sofridas pelas encaixantes e pelas supracrustais do Distrito Ferrífero de Itabira, enquanto somente duas estão impressas no Granito Borrachudos. Grossi Sad et al. (1990) descreve situações em que essa rocha corta os anfibolitos e também as rochas da Suíte Guanhões.

Os Gnaisses Bicas, encaixantes dos pegmatitos Pé da Serra e Talho Aberto, bem como os Gnaisses Monlevade, relacionados à corpos menores, foram pesquisados por Reeves (1966) que realizou estudos petrográficos detalhados desses corpos sem contudo desenvolver qualquer abordagem de caráter geocronológico.

7.5. DISCUSSÃO DOS DADOS

Através do conjunto de dados apresentados pela Tabela 7.4 e sabendo que, parte dos resultados geocronológicos compilados por Herz (1970) foram produzidos desde o início da década de 1960 (Herz et al. 1961 e Aldrich et al. 1966), pode-se perceber que este acervo foi conseguido durante os últimos trinta e cinco anos, por diferentes metodologias analíticas. A interpretação dessas idades e a elaboração da

história geológica para esta área de estudo constituem uma tarefa bastante árdua devido às limitações analítico-metodológicas existentes, em maior grau nas análises mais antigas, como também ao conhecimento geológico mais restrito decorrente dos mapeamentos, em escala regional, executados nas décadas de 60 e 70, principalmente.

O trabalho de Teixeira et al. (1990) constitui um estudo integrado dos valores analíticos obtidos pelos autores, associados ao acervo radiométrico existente. Trata-se da mais completa história geológica da região leste do Espinhaço Meridional, escrita após a publicação de Brito Neves et al. (1979).

Após este período poucos pesquisadores apresentaram dados geocronológicos para esta área de estudo. Os trabalhos mais recentes são de Dossin et al. (1993), Dussin, I.A. (1994) e Dussin, T.M. (1994) abordando as diversas litologias existentes, exceto os pegmatitos que foram analisados por Marciano et al. (1993).

Schorscher (1992), em seu quadro síntese sobre a evolução geológica regional, relaciona a formação da bacia vulcano-sedimentar e deposição das seqüências litológicas do "greenstone belt" Rio das Velhas entre 2.800 e 2.650 Ma., valores que são ratificados pelos trabalhos de autores como Brito Neves et al. (1979), Siga Jr. (1982), Müller et al. (1986), Teixeira et al. (1990), entre outros. Os Gnaisses Guanhães foram datados por Müller et al. (1986), que reportam o valor 2.660 Ma. como sendo a idade mínima do metamorfismo de alto grau que atuou sobre estas rochas, as quais constituem o embasamento gnáissico-migmatítico exposto na área de pesquisa.

Antes dos trabalhos publicados por Lauenstein (1984) e Müller et al. (1986), foram realizadas inúmeras datações em rochas dos arredores de Guanhães por Siga Jr. (1982), exibindo uma expressiva dispersão dos valores em diagrama isocrônico com idades entre 2.400 e 1.800 Ma. Estes dados foram interpretados pelos autores como próprios de uma área de evolução antiga (Arqueana) que foi submetida a eventos superimpostos de uma forma diferenciada. As rochas migmatíticas analisadas, dos arredores de Guanhães indicaram 2.200 Ma. e $RI=0,7358$, corroborando as interpretações iniciais dos processos de retrabalhamento do Proterozóico Inferior.

Determinação U/Pb em rochas do embasamento na região de Gouveia apresentou idade 1.844 ± 15 Ma. (intercepto inferior) que pode ser interpretada como a perda parcial de Pb ocasionada pela superimposição do metamorfismo que ocorreu no Proterozóico Médio e Superior (Machado et al. 1989 e Teixeira et al. 1990). Esta análise baseia-se no padrão geocronológico Rb/Sr obtido em vários afloramentos datados na região.

As mais recentes análises geocronológicas dos granitos da Suite Borrachudos e das metavulcânicas ácidas de Conceição do Mato Dentro indicam uma idade de 1.770 Ma. para o posicionamento destes granitóides que coincide com a atividade vulcânica ácida formadora dos metariolitos, (Dussin, T.M. 1994).

Conforme Teixeira et al. (1990), "No Proterozóico Superior toda esta região sofreu os efeitos da Orogênese Brasileira, registrada através de uma tectônica colisional (Leonardos et al. 1976; Herrgesell & Pflug 1985), responsável pelo fechamento da Bacia do Espinhaço. A zona de confronto entre placas possivelmente foi coincidente com o lineamento N-S de extensão regional que encaixa o vale do Alto Rio Guanhães (Dossin & Dossin 1986). As condições de metamorfismo atingiram o fácies anfibolito superior com migmatizações (750 Ma.) e geração de milonitos e rejuvenescimentos completos das idades (510-480 Ma.) nessa região, decrescendo para oeste até xisto verde baixo e anquimetamorfismo nas regiões adjacentes do Cráton". Esta última observação pode ser visualizada através da Figura 7.1.

Os pegmatitos são as unidades litológicas mais jovens desta região, relacionadas ao Ciclo Brasileiro de 580 Ma. a 408 Ma. (Marciano 1985 e Marciano et al. 1993). Entretanto as metodologias K/Ar e Rb/Sr empregadas na obtenção destes dados podem identificar somente o último evento capaz de ocasionar a rehomogeneização isotópica destes sistemas. Portanto, este dado de cerca de 500Ma. deve ser interpretado como idade mínima.

7.6. CONCLUSÕES

Considerando os dados divulgados através dos trabalhos científicos (Tabelas. 7.1 e 7.4), e estes produzidos nesta Tese, pode-se portanto inferir que:

- Os gnaisses da Suite Guanhães, encaixantes dos corpos pegmatitos, são rochas arqueanas, mais antigas que 2.660 Ma. (Rb/Sr), pois este valor foi interpretado como sendo a idade mínima do metamorfismo que atuou sobre estas rochas (Lauenstein 1984, Müller et al. 1986). Estas rochas foram afetadas posteriormente, tanto pelo Ciclo Transamazônico, como pelo Ciclo Brasileiro (Teixeira et al. 1990).
- Os gnaisses da Suite Borrachudos que ocorrem nesta área foram datados em 1.729 ± 12 Ma. pelo método Pb/Pb, em uma amostra do Plúton São Félix (Dossin et al. 1993; Dussin, I. A. 1994), sendo portanto contemporâneos dos metariolitos ácidos de Conceição do Mato Dentro (Brito Neves et al. 1979; Machado et al. 1989); ambos sendo afetadas pela orogênese termal Brasileira.

- Os pegmatitos analisados neste trabalho, pelo método K/Ar, apresentam idades no intervalo entre $502,1 \pm 30,7$ e $529,9 \pm 13,2$ Ma., estando portanto relacionados ao Ciclo Brasileiro (Marciano et al. 1993).
- Tanto os corpos localizados dentro do Quadrilátero Ferrífero em João Monlevade (Herz 1970) e Rio Piracicaba (Marciano et al. 1993), como os demais que afloram na borda oriental do Cráton do São Francisco, são pegmatitos brasileiros pertencentes portanto, à mesma província, segundo o conceito adotado por Ginsburg et al. (1979) e Cerný (1982a).
- Os pegmatitos litiníferos de São João del Rei não pertencem à PPO pois são mais antigos. As datações de muscovita do Pegmatito de Volta Grande deram idade de 1.105 ± 39 a 1.186 ± 98 M.a. (Guimarães 1951). Estes pegmatitos estão associados a um complexo granítico do Pré-Cambriano Inferior ou Transamazônico, datado pelo método Rb/Sr em 1.932 ± 20 Ma (Quéméneur & Vidal 1989).

8. FELDSPATOS

Dentre os minerais formadores das rochas pegmatíticas, destacam-se aqueles pertencentes ao grupo dos feldspatos. As espécies minerais deste grupo que ocorrem em corpos pegmatíticos da porção ocidental da Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais (PPO) podem ser classificadas como feldspatos alcalinos de baixa temperatura como microclina máxima e albita de baixa temperatura. Ambas podem ser definidas pela fórmula geral MT_4O_8 , onde a estrutura anelar T_4O_8 constitui-se de quatro tetraedros SiO_4 dos quais um deles é substituído por um tetraedro AlO_4 . Esta estrutura e a ocupação predominante das posições T1O pelo átomo de alumínio confere à microclina uma simetria $\bar{1}$ triclinica semelhante à da albita (Deer et al. 1966). As posições M são ocupadas, principalmente por metais do grupo alcalino e são responsáveis pela neutralização da carga residual dos anéis T_4O_8 (Smith 1974a). A Figura 8.1, mostra aspectos desta estrutura.

O processo de arrefecimento atuante na cristalização dos feldspatos está intimamente relacionado à exsolução gradual com formação de feldspato potássico e de feldspato sódico quase puros. A exsolução da microclina é observada mesmo no intercrescimento gráfico, e o grau de ordenamento dos feldspatos potássicos é variável enquanto o da albita de baixa temperatura é altamente ordenado (Barth 1969).

8.1. ASPECTOS MORFOLÓGICOS

Os cristais de microclina podem alcançar de 2 a 3 metros de altura por 1m de largura na Lavra da Generosa. As lavras localizadas em Santa Maria de Itabira são portadoras de cristais, que ocorrem com muita frequência, na forma euédrica e cujas dimensões variam desde alguns centímetros até 30 cm. Estes cristais apresentam coloração branca, bege, rosada e ainda a variedade verde, em diferentes tons. O brilho perláceo é observado em amostras sem alteração tendendo a um brilho comum naquelas que se apresentam parcialmente caulinizadas. O peso específico variou entre 2,44 e 2,59 sendo que os feldspatos encontrados na zona marginal foram aqueles que apresentaram os valores mais altos, provavelmente devido a um maior conteúdo em elementos do grupo dos metais alcalinos terrosos (Heier & Taylor 1959b). Em um número expressivo de corpos pegmatíticos os feldspatos foram completamente caulinizados. A clivagem é nítida segundo {001} e menos característica segundo {010}.

Figura 8.1 - Aspectos dos feldspatos: a) unidade anelar da cadeia dos feldspatos segundo Hatch et al. 1972; b) projeção da estrutura sobre (010) (segundo Megaw 1974 e Ribbe 1975).

A maioria dos feldspatos potássicos analisados, oriundos das diferentes zonas dos corpos pegmatíticos, apresenta-se macropertitizados.

As amostras de albita exibem dois hábitos distintos. Na zona marginal e nos corpos de substituição o hábito mais frequente é o maciço, enquanto em outras amostras dessas últimas unidades, a albita se mostra bem cristalizada apresentando hábito tabular, em cor branca ou incolor (variedade cleavelandita).

Os feldspatos potássicos provenientes de lavras que foram submetidas a processos de alteração mostram feições semelhantes à corrosão devido a perda parcial ou total das lamelas pertíticas.

8.2.ASPECTOS MICROSCÓPICOS

A análise microscópica das amostras de microclina das zonas mural e intermédia evidenciaram o sistema de dupla geminação (leis da albita e periclina) característica da mudança estrutural da simetria monoclínica para triclínica. A presença

de lamelas pertíticas desenvolvidas perpendicularmente ao eixo cristalográfico *a*, classificada como venular, é o tipo mais característico dos pegmatitos desta área. A forma em barras ou formas intermediárias entre os dois tipos são também de ocorrência comum (Barth 1969). A Fotomicrografia 8.1 de feldspato potássico da Lavra da Generosa mostra aspectos desta textura pertítica de maior frequência.

Fotomicrografia 8.1 - Aspecto apresentado pelas lamelas pertíticas tipo venular (Barth 1969), observadas em microclina da Lavra da Generosa em Sabinópolis, MG.

8.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Através de análises difratométricas pelo método do pó foram identificados os feldspatos, microclina e albita. Os difratogramas das amostras de microclina apresentam a reflexão de $3,18\text{\AA}$ correspondente à presença de albita constituinte das lamelas pertíticas. A Figura 8.2 mostra os valores obtidos para a diferença entre o ângulo 2θ dos planos (131) e $(\bar{1}31)$ das amostras de albitas obtidas em diferentes posições no interior do Pegmatito da Generosa, lançados no gráfico de Mackenzie (1957). O intervalo de temperatura de cristalização apresentado é de 450°C a 600°C (Tolentino Jr. et al. 1988), enquanto para a Lavra da Ponte da Raiz foi de 200°C a 500°C (Edim et al. 1988).

O estado estrutural dos feldspatos potássicos foi avaliado utilizando-se a metodologia descrita por Goldsmith & Laves (1954), onde o valor da triclinicidade é

obtido pela fórmula $\Delta = 12,5 (131 - \bar{1}\bar{3}1)$, onde Δ varia de zero a 1, da forma monoclinica para a forma triclínica. O intervalo da triclínica obtido em feldspatos das lavras Generosa (20 análises), Ponte da Raiz (34 amostras) e Talho Aberto (27 amostras), cai na faixa entre 0,72 e 1,0. Esses valores correspondem a microclina de ordenamento máximo na maioria das análises, ocorrendo entretanto valores situados no intervalo 0,51 e 0,72 referentes á microclina intermediária.

Três são os mecanismos propostos para a formação das pertitas segundo Smith (1974b): exsolução, substituição e cristalização simultânea. O processo de exsolução envolve a separação do feldspato sódico da fase hospedeira potássica, porém é determinado ainda por modificações estruturais, estando ligado á mudança no estado de ordenação do feldspato potássico que passa de simetria monoclinica para triclínica. Esta transformação ocorre em uma temperatura de 450°C (Martin 1982). As lamelas pertíticas se orientam perpendicularmente ao eixo cristalográfico a, e sua desmisturação inicia-se quando a temperatura alcança a curva do solvus do haplogranito, isto é, abaixo de 650°C (Martin 1982).

Dados experimentais de Swanson & Fenn (1992) para sistemas graníticos ricos em flúor sinalizam um abaixamento da temperatura de cristalização de 25 a 50°C em relação aos sistemas graníticos sem flúor estudados por Tuttle & Bowen (1958).

Como os sistemas geradores dos pegmatitos da porção ocidental da PPO são ricos em flúor, deve-se então supor que, os dados relativos á temperatura de cristalização que serão obtidos deverão apresentar valores mais baixos, segundo os experimentos de Swanson & Fenn (1992). A adoção deste modelo confirma como corretos os dados obtidos por Tolentino Jr. et al. (1988) e de Edim et al. (1988), em

Figura 8.2 - Relação entre $\Delta 2\theta 131$ e a temperatura de cristalização das amostras de albita da Lavra da Generosa, modificado de Tolentino Jr. et al. (1988). Gráfico original de Mackenzies (1957) in: Smith (1972).

reflexões de albita de microclina pertítica, com intervalo de cristalização de 450 a 600 °C no pegmatito da Generosa, e de 200 a 500°C na Lavra da Ponte da Raiz.

8.4. ESTUDO POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

As vibrações de estiramento (stretching) que ocorrem entre 950 e 1200 cm^{-1} são as mais nítidas, e caracterizam tanto as ligações Si-O-Si como as Al-O-Si da estrutura dos feldspatos. As vibrações de deformação (bending) destas mesmas ligações ocorrem entre 400 e 550 cm^{-1} . Os silicatos com arranjo tridimensional dos tetraedros $[\text{SiO}_4]^{4-}$ apresentam bandas de absorção no infravermelho na região de 550 e 850 cm^{-1} que representam o estiramento simétrico T-O-T, onde T é um íon em coordenação tetraédrica, geralmente Si ou Al (Farmer 1974). As Figuras 8.3 e 8.4 mostram espectros de feldspatos das lavras estudadas. Estes diagramas apresentam as bandas de absorção características das estruturas dos feldspatos sódico e potássico, sendo que a região localizada entre 700 e 800 cm^{-1} permite uma distinção visual bastante rápida entre a albita e a microclina. Os diagramas das Figuras 8.3 e 8.4 mostram ainda absorções em 3.400 e 1.630 cm^{-1} referentes respectivamente às vibrações de estiramento e de deformação, da molécula de água. Em 2.340 cm^{-1} ocorre banda de absorção referente à molécula de gás carbônico, enquanto as absorções em 2.880 cm^{-1} e 2.940 cm^{-1} que aparecem em quase todos os diagramas de feldspatos das lavras estudadas, são características de hidrocarboneto não saturado, muito provavelmente, metano (Marciano 1985). A absorção que ocorre em 1395 cm^{-1} nos feldspatos das lavras do Ferreirinha e do Boi em Governador Valadares, característica do boro em coordenação tetraédrica, substituindo o silício (Marciano 1985, Marciano & Correia Neves 1987), não foi observada nos diagramas dos feldspatos da região de tese. Os dados relacionados acima nos permitem afirmar que as duas únicas espécies de feldspatos identificados nos corpos pegmatíticos estudados são microclina e albita, concordantes com os dados obtidos por difratometria de raios X. Os componentes fluidos caracterizados nestes feldspatos foram água, dióxido de carbono e metano. Não ocorre substituição do silício pelo boro, característica de corpos pegmatíticos desprovidos de turmalina, onde este elemento, quando existente, penetra nas estruturas de outros minerais como feldspatos, micas, quartzo, berilo e granada.

8.5. QUIMISMO DOS FELDSPATOS

Para um melhor entendimento dos processos evolutivos e genéticos que atuaram nos corpos pegmatíticos que se localizam na borda centro ocidental da Província Pegmatítica Oriental em Minas Gerais, submeteu-se à análises químicas

Figura 8.3. Espectros de absorção no infravermelho de microclina. Aham-se em destaque as bandas de absorção dos componentes fluidos, como H_2O , CO_2 , CH_4 e OH . A amostra n° 2 encontra-se parcialmente caulinizada. Amostra n° 1 - Lavra Ponte da Raiz; n° 2 - Lavra do Talho Aberto.

Figura 8.4. Espectros de absorção no infravermelho de albita. Estão em destaque as bandas de absorção dos componentes fluidos, como H₂O, CO₂, CH₄, B, e OH⁻. A amostra nº 2 encontra-se parcialmente caulinizada. Amostra nº 1- Lavra Ponte da Raiz, nº 2- Lavra do Talho Aberto.

completas, 34 amostras de feldspatos, através de várias técnicas descritas no capítulo 4. A Tabela 8.1 apresenta os dados químicos obtidos para os feldspatos potássicos, seguidos do cálculo de átomos por célula unitária, e acrescidas pela composição nas moléculas Or-Ab-An.

8.5.1. Composição química da microclina pertítica

As posições T da fórmula estrutural unitária podem ser ocupadas por Si^{4+} , Al^{3+} ocorrendo, entretanto, a possibilidade de serem encontrados nestes sítios o B^{3+} e o P^{5+} . Nos feldspatos estudados os teores em boro são, de um modo geral, inferiores ao limite de detecção do método analítico, o mesmo acontecendo com o fósforo, o ferro e o titânio. Outros elementos que poderiam ser encontrados neste sítio são o berílio, o germânio e o gálio (Martin 1982) que não foram avaliados neste trabalho. Portanto as posições tetraédricas T nestes feldspatos são preenchidas com Si^{4+} e Al^{3+} . A posição M é aquela caracterizada pela presença dos cátions alcalinos ou alcalinos terrosos. Os teores em potássio variaram desde 9,33 a 12,83%, ocorrendo uma concentração de análises entre 10,01 e 11,00% (15 amostras), enquanto sete feldspatos apresentaram teores na faixa entre 11,01 e 12,00%. Apenas 4 amostras mostraram teores maiores que 12,00%, semelhantes àquelas encontradas em pegmatitos com minerais radioativos de Moçambique. Por analogia com os africanos, o intervalo de maior frequência na área deste trabalho seria o característico dos pegmatitos radioativos e dos potássicos (Lopes Nunes 1973). Uma única amostra apresentou 9,33% em K que comparadas com as africanas também pertencem a pegmatitos potássicos com berilo e columbita (Lopes Nunes 1973). O diagrama ternário de Yoder et al. (1957) representado na Figura 8.5 é bastante similar aos construídos com os dados de feldspatos dos pegmatitos de Moçambique (Lopes Nunes 1973), e dos feldspatos de pegmatitos de Governador Valadares (Marciano 1985). Os valores encontrados para o sódio em feldspatos potássicos correspondem às pertitas. As fases sódicas apresentam composição albitica, pois o percentual de moléculas An alcança no máximo 3,63%.

8.5.1.1. Comportamento dos elementos traços

Os elementos que ocorrem em teores inferiores à 0,1% (1000 ppm) são considerados traços, sendo que na estrutura dos feldspatos, entre os mais habituais, podem ser citados Rb, Cs, Li, Ba e Sr. O conteúdo dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos tem servido para classificar os pegmatitos em diferentes tipos em uma região, da forma utilizada por vários autores mas destacadamente por Varlamoff em seus trabalhos sobre zoneografia dos pegmatitos da África (Varlamoff 1954a, 1954b, 1959, 1961, 1972). O intervalo de ocorrência destes elementos é também característico nos

LAVRA	GENEROSA							Sr JOSIAS	
Nº	4448 C	4469 C	4472 B	4481	4604 A	4490 F	4590 F	5171	5173
SiO ₂	65,2	65,1	64,7	65,0	65,2	65,5	65,7	65,5	65,5
Al ₂ O ₃	18,7	18,6	18,8	18,8	18,4	19,1	19,2	18,2	18,5
Fe ₂ O ₃	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
FeO	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,05	< 0,05	< 0,07	< 0,07
CaO	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,06	0,15
MgO	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
Na ₂ O	3,2	3,2	2,0	2,1	2,6	2,2	2,3	2,9	2,1
K ₂ O	12,3	12,5	13,8	13,2	13,2	12,5	12,3	12,6	13,3
MnO	0,01	< 0,01	0,03	0,03	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
TiO ₂	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
P ₂ O ₅	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
F	0,012	0,013	0,013	0,011	0,017	0,011	0,13	0,020	0,011
PF	0,54	0,39	0,53	0,83	0,45	0,35	0,15	0,46	0,36
S. Total	99,96	99,80	99,87	99,97	99,87	99,66	99,78	99,74	99,92
O + F	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,06	< 0,01	< 0,01
S. Final	99,96	99,80	99,87	99,97	99,87	99,66	99,78	99,74	99,92
Fe tt	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,01	0,06	< 0,05	< 0,05
Th	5	7	< 5	11	14	< 10	< 10	< 5	< 5
Rb	1500	1820	1710	1910	1810	2110	1840	46	520
Ba	79	49	75	39	46	86	46	240	1310
Hf	< 8	< 8	< 8	< 8	< 8	< 5	< 5	< 8	< 8
Ta	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10	< 10	< 5	< 5
Y	29	3	63	30	9	< 5	< 5	7	3
Sr	40	33	46	33	32	21	19	27	120
Nb	8	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10	< 10	< 5	< 5
Cs	9	5	< 5	< 5	5	14	13	58	9
Zr	210	270	12	16	240	250	< 5	15	18
Li	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5		< 5	< 5	< 5
B	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Pb	91	149	160	171	137	< 10	< 10	149	126
Si ⁴⁺	2,989	2,988	2,983	2,992	2,998	2,994	2,994	3,010	3,004
Al ³⁺	1,010	1,006	1,022	1,020	0,997	1,029	1,031	0,986	1,000
Ca ²⁺	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,003	0,007
Na ¹⁺	0,284	0,285	0,179	0,187	0,232	0,195	0,203	0,258	0,187
K ¹⁺	0,719	0,732	0,812	0,775	0,774	0,729	0,715	0,739	0,778
F	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,019	0,003	0,002
Rb ¹⁺	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,007	0,006	0,000	0,002
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
Cátions	5,010	5,020	5,004	4,983	5,010	4,957	4,952	4,996	4,980
Carga	15,998	15,998	15,998	15,998	15,998	15,998	15,981	15,997	15,998
Or	80,96	81,20	88,33	87,37	84,88	86,18	85,49	82,62	86,97
Ab	18,72	18,49	11,37	12,31	14,82	13,49	14,18	17,06	12,17
An	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31	0,33	0,33	0,32	0,86

TABELA 8.1 - Composição química de feldspatos potássicos com os valores percentuais das moléculas Or-Ab-An de amostras das lavras da Generosa e Sr.Josias. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 16 átomos de oxigênio por célula unitária.

LAVRA	PONTE	DA RAIZ						
Nº	4322 FR	4326 FB	4333 FB	4336 FB	4361 FBM	4376 FB	4348 FR	4370 FB
SiO ₂	64,9	64,9	65,0	65,2	65,3	65,6	65,8	65,6
Al ₂ O ₃	18,8	18,7	18,6	18,5	18,4	18,1	19,1	19,3
Fe ₂ O ₃	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
FeO	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	<0,05	<0,05
CaO	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,05	<0,05
Na ₂ O	3,1	2,9	2,9	2,4	2,8	2,9	2,4	2,5
K ₂ O	12,8	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	12,3	12,2
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
TiO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,026	0,016	0,015	0,016	0,019	0,011	0,019	0,011
S.Total	99,97	99,95	99,99	99,86	99,88	99,97	99,75	99,74
O $\equiv$ F	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
S.Final	99,96	99,95	99,99	99,86	99,88	99,97	99,95	99,74
Fe tt	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,02	0,02
Th	<5	<5	<5	<5	13	<5	<10	<10
Rb	950	1320	1220	900	2800	1150	2020	2150
Ba	450	240	180	720	89	230	160	130
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	<5	<5	<5	<5	<5	<6	<10	<10
Y	8	<3	10	10	21	10	5	<5
Sr	210	120	150	240	62	150	88	64
Nb	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<10
Cs	13	19	30	11	140	5	39	27
Zr	18	15	16	14	8	16	<5	<5
Li	<5	<5	<5	<5	<5	<5	8	<5
B	<10	<10	<10	<10	<10	<10	12	<10
Pb	126	69	114	69	46	69		
Si ⁴⁺	2,978	2,980	2,985	2,998	3,009	3,009	2,997	2,994
Al ³⁺	1,017	1,012	1,007	1,003	0,979	0,979	1,020	1,031
Ca ²⁺	0,003	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Na ¹⁺	0,276	0,258	0,258	0,214	0,258	0,258	0,212	0,203
K ¹⁺	0,749	0,773	0,773	0,774	0,761	0,761	0,751	0,751
F	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,019
Rb ¹⁺	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004	0,004	0,006	0,007
Ba ²⁺	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Cátions	5,028	5,031	5,030	4,996	5,013	5,013	4,957	4,953
Carga	15,996	15,998	15,998	15,998	15,998	15,998	15,997	15,981
Or	82,00	83,40	83,40	85,80	83,91	83,40	84,92	84,32
Ab	17,61	16,30	16,30	13,89	15,79	16,30	14,75	15,35
An	0,39	0,30	0,30	0,31	0,31	0,30	0,33	0,33

Tabela 8.1 - Composição química de feldspatos potássicos com os valores percentuais das moléculas Or-Ab-An de amostras da lavra da Ponte da Raiz. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 16 átomos de oxigênio por célula unitária.

LAVRAS	TALHO	ABERTO			CHEIRA PAU	TABOCA	
Nº	4867 AM	4912 AM	4874 AM	4920 TA	5162	5164	5107 AM
SiO ₂	64,2	64,3	64,2	64,5	65,3	65,2	65,6
Al ₂ O ₃	18,7	18,8	19,8	19,2	18,5	18,2	19,2
Fe ₂ O ₃	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,27	<0,10
FeO	<0,07	<0,07	<0,05	<0,05	<0,07	<0,07	0,05
CaO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,07	0,09	0,14
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ O	0,63	0,74	0,87	0,62	2,0	2,6	2,9
K ₂ O	15,3	14,7	14,0	15,1	13,6	12,9	11,2
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
TiO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,027	0,023	0,10	0,084	0,012	0,010	0,16
PF	0,86	1,19	1,02	0,35	0,47	0,52	0,39
S.Total	99,72	99,75	99,99	99,85	99,95	99,79	99,64
O ≡ F	0,01	0,01	0,04	0,04	<0,01	<0,01	0,07
S.Final	99,71	99,74	99,95	99,81	99,95	99,79	99,57
Fe tt	<0,05	<0,05	0,02	0,02	0,21	0,21	0,04
Th	6	12	<10	<10	<5	<5	<10
Rb	2670	2340	1510	1610	450	460	370
Ba	160	77	90	440	230	940	1780
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<10
Y	33	3	9	12	11	10	7
Sr	21	16	18	21	45	190	280
Nb	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<10
Cs	43	28	14	80	<5	<5	<5
Zr	10	12	5	9	16	18	21
Li	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
B	<10	<10	<10	<10	<10	<10	16
Pb	126	149			23	103	
Si ⁴⁺	2,986	2,990	2,964	2,977	3,002	3,007	2,993
Al ³⁺	1,025	1,030	1,077	1,045	1,002	0,989	1,032
Ca ²⁺	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	0,004	0,007
Na ¹⁺	0,057	0,067	0,078	0,055	0,178	0,232	0,257
K ¹⁺	0,908	0,872	0,825	0,889	0,798	0,759	0,652
F	0,004	0,003	0,015	0,012	0,002	0,001	0,023
Rb ¹⁺	0,009	0,008	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,004
Cátions	4,988	4,969	4,951	4,975	4,986	4,995	4,946
Carga	15,996	15,997	15,985	15,985	15,988	15,998	15,999
Or	96,18	95,41	94,49	96,18	88,10	84,45	80,57
Ab	3,52	4,28	5,19	3,52	11,51	15,08	18,57
An	0,30	0,31	0,32	0,30	0,39	0,47	0,86

Tabela 8.1 - Composição química de feldspatos potássicos como os valores percentuais das moléculas Or-Ab-An de amostras das lavras do Talho Aberto, Cheira Pau e Taboca. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 16 oxigênios por célula unitária.

LAVRAS	MORRO ESCURO	AMÉLIO RODRIGUES		VILA ESPERANÇA
Nº	5061 F	5179	5181	5080 A
SiO ₂	64,4	64,6	65,0	65,7
Al ₂ O ₃	19,7	18,6	18,6	17,8
Fe ₂ O ₃	<0,10	<0,10	<0,10	0,10
FeO	<0,05	<0,07	<0,07	0,14
CaO	0,05	0,05	0,09	0,21
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	0,10
Na ₂ O	1,5	0,86	2,2	2,1
K ₂ O	13,3	14,9	13,4	13,6
MnO	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
TiO ₂	<0,05	<0,05	<0,05	
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,14	0,026	0,037	0,030
PF	0,68	0,81	0,48	
S.Total	99,77	99,87	99,79	99,76
O = F	0,06	0,01	0,02	0,01
S.Final	99,71	99,86	99,79	99,75
Fe tt	0,02	<0,05	<0,05	0,12
Th	<10	<5	<5	<5
Rb	800	540	460	890
Ba	560	1470	1390	330
Hf	<8	<8	<8	<8
Ta	<10	<5	<5	<5
Y	7	7	8	21
Sr	140	130	120	160
Nb	<10	<5	24	5
Cs	5	<5	<5	9
Zr	13	20	23	16
Li	<5	<5	<5	<5
B	<10	<10	<10	<10
Pb		160	34	1835
Si ⁴⁺	2,967	2,990	2,993	3,053
Al ³⁺	1,070	1,030	1,009	0,975
Ca ²⁺	0,002	0,002	0,004	0,010
Na ¹⁺	0,134	0,067	0,196	0,018
K ¹⁺	0,782	0,872	0,787	0,806
F	0,020	0,003	0,005	0,004
Rb ¹⁺	0,003	0,008	0,001	0,000
Ba ²⁺	0,001	0,000	0,003	0,001
Cátions	4,958	4,969	4,995	4,874
Carga	15,980	15,997	15,996	15,996
Or	90,60	94,81	86,85	86,85
Ab	9,08	4,89	12,69	12,0
An	0,33	0,31	0,47	1,15

Tabela 8.1 - Composição química de feldspatos potássicos com os valores percentuais das moléculas Or-Ab-An de amostras das lavras do Morro Escuro, Amélio Rodrigues e Vila Esperança. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 16 oxigênios.

quatro diferentes grupos genéticos propostos por Ginsburg et al. (1979). A concentração em álcalis varia também em um mesmo corpo pegmatítico, sendo que o comportamento dos elementos alcalinos é antagônico ao dos elementos alcalinos terrosos. Os teores em Li, Rb e Cs aumentam da zona marginal em direção ao núcleo, sendo que os valores mais elevados são encontrados nas unidades de substituição. Os elementos Ba e Sr exibem conteúdos decrescentes nesta mesma direção (Heier & Taylor 1959a, 1959b; Correia Neves 1962, 1981, 1990; Lopes Nunes 1973; Sá 1977; Wegner 1983; Marciano 1985).

Figura 8.5 - Os feldspatos potássicos e os plagioclásios no sistema ternário Ab-Or-An. Linha WZ - composição do líquido em equilíbrio com dois feldspatos. Linha PL - limite máximo de miscibilidade ternária dos feldspatos naturais (modificado de Yoder et al. 1957).

A tabela 8.2. exibe os intervalos dos valores analíticos apresentados para os elementos alcalinos e alcalinos terrosos em feldspatos potássicos de algumas partes do mundo, e outros de pegmatitos da PPO. A inclusão parcial dos dados produzidos pelo trabalho de Lopes Nunes (1973), para pegmatitos da Província Pegmatítica do Alto Ligonha, se deve ao fato de que foram escolhidos os grupos pegmatíticos que apresentam maiores semelhanças mineralógicas e químicas com os estudados neste trabalho.

PAÍS	Identificação dos pegmatitos	Rb	Cs	Li	Ba	Sr	Nº Amostras	AUTOR(ES)
Noruega	da Região Sul	280 a 3400	<1 a 700	0,1 a 4,6	50 a 3400	20 a 370	39	Heier & Taylor(1959 a, b, 1963)
Portugal	Venturinha	970 a 2250			19 a 450	<5 a 120	37	Correia Neves (1962)
Moçambique	Pegmatitos radioativos	620 a 3730	1 a 620	<1 a 3	186 a 1738	10 a 350	9	Lopes Nunes (1973)
	Pegmatitos à amazonita	3510 a 4520	105 a 1630	5 a 15	10	10	4	Lopes Nunes (1973)
Brasil	Itinga - Araçuaí PS	2550 a 4400	50 a 130				4	Sá (1977)
	Itinga - Araçuaí PZC	2250 a 13500	85 a 1800				15	Sá (1977)
	Galiléia Tim	310 a 2210	0 a 102	20 a 130	68 a 177	16 a 68	13	Wegner (1983)
	Sabinópolis Generosa	1245 a 1521	34 a 70	0 a 5	60 a 155	32 a 57	17	Wegner (1983)
	Araçuaí Urubú	1532 a 7168	75 a 129	7 a 319	133 a 234	13 a 140	7	Wegner (1983)
	Gov. Valadares Ferreirinha	760 a 1500			20 a 500	<10 a 52	16	Marciano (1985)
	Gov. Valadares Olho de Gato	850 a 2150	140 a 340		5 a 38	<5 a 8	22	Marciano (1985)
	Gov. Valadares Faria	1240 a 2300	83 a 170		<5 a 47	<5 a 5	22	Marciano (1985)
	Coronel Murta PS	960 a 1430			44 a 570		4	Pedrosa Soares et al. (1990)
	Coronel Murta PZS	930 a 1200			<20 a 89		5	Pedrosa Soares et al. (1990)
	Coronel Murta PZC	770 a 6000			<20 a 1250		11	Pedrosa Soares et al. (1990)

Tabela 8.2 - Valores analíticos dos elementos alcalinos e alcalinos-terrosos em ppm, em amostras de microclina oriundas de várias ocorrências da PPO e do mundo. Os intervalos registrados para cada elemento foram obtidos através dos trabalhos dos autores relacionados na última coluna à direita. PS = pegmatito simples, PZS = pegmatito zonado simples e PZC = pegmatito zonado complexo.

A tabela 8.3. mostra os mesmos elementos desta apresentada no parágrafo anterior, com seus respectivos intervalos, para as amostras que ocorrem na borda ocidental da PPO. A comparação dos dados aponta uma maior similaridade química entre os pegmatitos estudados com aqueles do tipo radioativo, de Moçambique. Os corpos das lavras do Ferreirinha e do Boi, em Governador Valadares (Marciano 1985), são aqueles que apresentam os valores mais baixos para os elementos alcalinos e alcalinos terrosos em feldspatos, contudo são mais elevados quando comparados com aqueles mostrados pelos corpos de ocorrência em Ferros. Os demais pegmatitos estudados se enquadram dentro dos intervalos observados para as lavras do Olho de Gato e do Faria. O bário e o estrôncio são muito mais abundantes nas lavras de Ferros e Santa Maria de Itabira do que naquelas estudadas por Marciano em Governador Valadares.

Municípios	Pegmatitos	Rb	Cs	Li	Ba	Sr	Nº de amostras
Sabinópolis	Generosa	1500 a 2110	<5 a 14	<5	39 a 86	19 a 46	7
Ferros	Sr.Josias, Cheira pau, Taboca, Amélio Rodrigues.	370 a 890	<5 a 58	<5	230 a 1780	27 a 280	8
Santa Maria de Itabira	Ponte da Raiz, Morro Escuro	900 a 2800	<5 a 140	<5	89 a 720	62 a 240	9
Rio Piracicaba	Talho Aberto	1510 a 2670	14 a 80	<5	77 a 440	16 a 21	4

Tabela 8.3. Valores analíticos dos elementos alcalinos e alcalino-terrosos em ppm, em amostras de microclina provenientes dos pegmatitos estudados nesta tese.

Os elementos alcalinos e alcalinos terrosos mais raros ocupam as posições M da estrutura dos feldspatos em substituição ao K, Na e Ca. As relações entre os elementos maiores e os traços ocupantes do sítio M na estrutura dos feldspatos são tomadas como indicadoras do fracionamento destes elementos nas diversas classes pegmatíticas. A razão K/Rb diminui devido ao enriquecimento tardio em Rb nas diferentes formações geológicas (Goldschmidt 1958). A constância desta relação tem sido constatada por numerosos pesquisadores em diferentes tipos de minerais e rochas. Heier & Taylor (1959 a) relacionam os intervalos médios de 219 a 485 e 160 a 583 para rochas graníticas e gnáissicas, respectivamente. Cerný (1991a) exibe os valores 229 e 159 para a razão K/Rb em granitos ricos em cálcio e leucogranitos peraluminosos, respectivamente. Quanto menores forem os valores apresentados para a razão K/Rb maior será o grau de diferenciação desta formação.

A Tabela 8.4 exibe os dados relativos às diferentes razões utilizadas como indicadoras do fracionamento magmático além da K/Rb, para diversos pegmatitos com ocorrências em diferentes partes do mundo e na PPO.

PAÍS	Identificação dos pegmatitos	K/Rb	K/Cs	Rb/Cs	Ba/Sr	AUTOR(ES)
Noruega	da Região Sul	34 a 215	57 a 129		1 a 19	Heier & Taylor(1959 a, b, 1963)
Portugal	Venturinha	51 a 113			1 a 17	Correia Neves (1962)
Moçambique	Pegmatitos radioativos	31 a 203	188 a 10 060	5 a 69	3 a 28	Lopes Nunes (1973)
	Pegmatitos à amazonita	8 a 26	65 a 326	7 a 33	1	Lopes Nunes (1973)
Brasil	Itinga - Araçuaí PS	25 a 36	759 a 1826	23 a 39		Sá (1977)
	Itinga - Araçuaí PZC	7 a 41	53 a 1118	13 a 43		Sá (1977)
	Galiléia Tim	52 a 149	1131 a 4075	12 a 38	2 a 10	Wegner (1983)
	Sabinópolis Generosa	71 a 91	1509 a 3435	19 a 45	1 a 5	Wegner (1983)
	Araçuaí Urubú	16 a 66	762 a 1341	20 a 52	4 a 16	Wegner (1983)
	Gov. Valadares Ferreirinha	49 a 158			1 a 7	Marciano (1985)
	Gov. Valadares Olho de Gato	29 a 122	280 a 866	4 a 9	<1 a 1	Marciano (1985)
	Gov. Valadares Faria	41 a 92	>110 a 1380	1 a 14	9	Marciano (1985)
	Coronel Murta PS	72 a 104				Pedrosa Soares et al. (1990)
	Coronel Murta PZS	82 a 106				Pedrosa Soares et al. (1990)
	Coronel Murta PZC	18 a 131				Pedrosa Soares et al. (1990)

Tabela 8.4 - Dados relativos às diferentes razões utilizadas como indicadoras do fracionamento dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos nas diversas classes de pegmatitos. PS = pegmatito simples, PZS = pegmatito zonado simples e PZC = pegmatito zonado complexo.

Os dados mostrados pela Tabela 8.5. permitem afirmar que os corpos pegmatíticos que ocorrem em Ferros são aqueles que sofreram menor diferenciação, pois os valores encontrados estão muito próximos dos dados apresentados pelas formações granito-gnáissicas. Os outros pegmatitos desta área podem ser

classificados, em ordem crescente do grau de diferenciação, da seguinte forma: em primeiro lugar Ponte da Raiz e Morro Escuro, em segundo Talho Aberto e finalmente Generosa. Os intervalos para as razões K/Rb e K/Cs dos pegmatitos estudados exibem um maior fracionamento nos elementos alcalinos e alcalinos terrosos quando comparados com os do tipo radioativo da Província Pegmatítica do Alto Ligonha. Quando confrontados com os dados de outros pegmatitos da PPO com ocorrência em Conselheiro Pena- Galiléia, Coronel Murta e Governador Valadares, os pegmatitos da área de tese caracterizam-se como os menos diferenciados.

Municípios	Pegmatitos	K	K / Rb	K / Cs	Rb / Cs	Ba / Sr
Sabinópolis	Generosa	10,21 a 11,04	49 a 68	7 414 a 22 900	146 a 382	1 a 410
Ferros	Sr.Josias, Cheira pau, Taboca, Amélio Rodrigues.	9,30 a 12,37	127 a 251	12 267 a 24 740	35 a 108	2,1 a 11,58
	Ponte da Raiz Morro Escuro	10,13 a 11,04	39 a 138	783 a 22 080	20 a 230	1,2 a 6,35
Rio Piracicaba	Talho Aberto	11,62 a 12,37	48 a 78	1 566 a 8 300	20 a 108	5 a 21

Tabela 8.5 - Dados relativos às diferentes razões utilizadas como indicadoras do fracionamento dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos, calculadas a partir de análises dos feldspatos potássicos provenientes dos pegmatitos da área desta tese

Com o objetivo de comparar o quimismo dos feldspatos de vários corpos da porção ocidental da PPO entre si, e ainda com dados obtidos por Wegner (1983), para os feldspatos da Lavra da Generosa, no intuito de classificá-los, foram construídos gráficos relacionando o teor em SiO_2 com os elementos traços incluindo também os denominados incompatíveis.

A Figura 8.6., gráfico Rb/ SiO_2 salienta a posição dos pontos referentes às amostras de feldspato das lavras localizadas no município de Ferros, que se colocam fora do campo referente aos pegmatitos radioativos de Moçambique. Os dados obtidos por Wegner são compatíveis com estes das análises deste trabalho.

Não há discordância entre os dados relativos ao bário obtidos por Marciano e aqueles publicados por Wegner (Figura 8.7). Os corpos do Talho Aberto e da Generosa têm seus pontos plotados fora do campo dos pegmatitos radioativos, na porção inferior do gráfico, enquanto os referentes ao Pegmatito Ponte da Raiz, 50% deles também se localizam na mesma porção fora da delimitação. Contudo todos os dados estão periféricos a esta área citada. A representação das análises das amostras

do Município de Ferros situa-se dentro deste contorno, dispondo-se de forma bastante dispersa.

Figura 8.6.. Relação Rb/SiO₂ nos feldspatos. Retângulo claro representa amostra da Generosa, retângulo negro- Ponte da Raiz, asterisco- Morro Escuro, triângulo, losango e X-lavras de Ferros, + Talho Aberto.

Figura 8.7. Relação Ba/SiO₂ em feldspatos. Retângulo claro representa amostras da Generosa, retângulo negro- Ponte da Raiz, asterisco- Morro Escuro, triângulo, losango e X- lavras de Ferros, + Talho Aberto.

A relação Sr/SiO_2 exibida pelo gráfico da Figura 8.8 indica os feldspatos procedentes dos municípios de Ferros e Santa Maria de Itabira como aqueles enriquecidos em Sr quando comparados com os outros. As lavras destes dois municípios apresentam teores mais elevados do que os valores obtidos para as lavras de Guilherme V, Boa Esperança e Gurué, do tipo radioativo estudados por Lopes Nunes.

Figura 8.8. Relação Sr/SiO_2 em feldspatos. Retângulo claro representa amostras da Generosa, retângulos negros - Ponte da Raiz, asterísco - Morro Escuro, triângulo, losango e X - lavras de Ferros, + Talho Aberto.

Dentre as variedades de cor encontradas nas lavras estudadas, é notável a ocorrência da variedade amazonita, com diversidade de tons da cor verde. A coloração verde azulada dos feldspatos potássicos têm sido alvo de especulações por vários pesquisadores quanto à origem da cor (Foord 1986), após ter analisado 110 amostras de amazonita de diferentes procedências, indicou 150 ppm como o valor mínimo encontrado para o chumbo, e 2000 ppm como sendo o valor máximo para este elemento. Lopes Nunes (1973) analisando amazonitas do Pegmatito de Santos detectou 1500 ppm de chumbo em uma amostra de cor verde, e 450 ppm na de coloração azul, porém valores como 250 ppm foram determinados em feldspatos potássicos de coloração rósea. Estudos específicos realizados por Hofmeister, utilizando vários métodos analíticos, indicam que a incorporação de grandes quantidades de chumbo força a conversão da estrutura triclínica para monoclínica, e mostram também que na formação do centro de cor há uma participação na razão 1:1 entre a concentração molar de água estrutural e o conteúdo em chumbo (Hofmeister &

Rossman 1981; Hofmeister 1985). O aquecimento de amazonitas em temperatura cerca de 300 a 400 °C (Foord & Martin 1979) provoca a perda da cor. Estas podem ser restauradas através da exposição das amostras à radiação X, ou mesmo outros tipos de radiação, entretanto a coloração nem sempre tem a mesma intensidade da inicial. Segundo Hofmeister & Rossman (1981, 1985) a radiação natural γ produzida pelo decaimento do ^{40}K dentro da estrutura do feldspato pode causar a conexão entre a água e o chumbo, promovendo assim um mecanismo gerador da cor verde da variedade amazonita. O OH° produzido pela radiação induz a dissociação da água que atua como agente oxidante, promovendo a seguinte transformação: $\text{Pb}^{2+} \Rightarrow \text{Pb}^{3+}$. O hidrogênio nascente liberado pela dissociação da água, simultaneamente forma um centro de cor libertando um elétron do oxigênio, que por sua vez se combina formando novamente a água. Como o OH° não é móvel, nem todo o chumbo existente na estrutura da amazonita pode ser oxidado. A substituição do chumbo e da água na estrutura se faz no sítio M, logo somente uma pequena parte do chumbo é denominada "ativa", pois é necessário que estes dois constituintes ocupem posições vizinhas.

O gráfico da Figura 8.9 apresenta a relação Pb/SiO_2 nos feldspatos estudados. As lavras da Generosa, Ponte da Raiz e Talho Aberto que tiveram amazonitas analisadas, exibem um maior conteúdo em Pb, porém os valores não alcançam 200 ppm. Não puderam ser registrados neste gráfico os dados referentes ao Pegmatito da Generosa obtidos por Wegner (1983), pois os valores estão no intervalo entre 284 e 600 ppm. Os dados obtidos pelo presente trabalho se mostram dispersos, alguns recaem nos limites dos campos de ocorrência dos pegmatitos potássicos, com poucos valores dentro do campo dos pegmatitos radioativos, segundo classificação de Lopes Nunes.

As figuras 8.10 e 8.11 representam, respectivamente, as razões Zr/SiO_2 e Y/SiO_2 nos feldspatos. Através da análise dos gráficos nota-se que as amostras da Lavra da Generosa são aquelas que apresentam maior conteúdo nestes elementos. Em relação ao Y, percebe-se uma posição intermediária ocupada pelos feldspatos da Lavra do Talho Aberto. As faixas colocadas à direita destes gráficos representam os intervalos de ocorrência do Zr e do Y nos granitóides encaixantes dos pegmatitos da região focalizada pela tese. Para o GNAISSE Bicas não se pode estabelecer qualquer correlação devido ao fato de se ter apenas uma análise. Os Granitos Borrachudos exibem os mais elevados teores tanto em Zr como em Y, o que está refletido na composição dos feldspatos do Pegmatito da Generosa, encaixado nele. O conteúdo em Zr e Y nos demais pegmatitos encaixados nos Gnaisses Guanhães, é muito

reduzido, porém os dados são compatíveis com os valores obtidos para a provável rocha geradora deles.

Figura 8.9. Relação Pb/SiO₂ em feldspatos. Retângulo claro representa amostras da Generosa, retângulo negro- Ponte da Raiz, asterisco- Morro Escuro, triângulo, losango e X- lavras de Ferros, + Talho Aberto. 1. Pegmatito Boa Esperança e Guilherme V (radioativos), 2. Igaro e Namalalo

Figura 8.10. Relação Zr/SiO₂ em feldspatos. Retângulo claro representa amostras da Generosa, retângulo negro- Ponte da Raiz, asterisco- Morro Escuro, triângulo, losango e X- lavras de Ferros, + Talho Aberto. As faixas à direita representam ocorrência de Zr nos granitóides.

Figura 8.11. Relação Y/SiO₂ em feldspatos. Retângulo claro representa amostras da Generosa, retângulo negro - Ponte da Raiz, asterisco - Morro Escuro, triângulo, losango e X - lavras de Ferros, + Talho Aberto. As faixas à direita representam ocorrência de Y nos granitóides.

A figura 8.12 chama a atenção para o fracionamento do F nos pegmatitos estudados. A diferença composicional relativa ao conteúdo em flúor das amostras de feldspato da Ponte da Raiz comparadas com a do Morro Escuro, pode ser indicativa de que ambos corpos formam um único pegmatito, onde na porção mais elevada se concentram os elementos mais leves, como por exemplo o F, enquanto as amostras coletadas nas partes mais inferiores do corpo, são empobrecidas neste elemento.

Figura 8.12. Relação F/SiO₂ em feldspatos. Retângulo claro representa amostra da Generosa, retângulo negro - Ponte da Raiz, asterisco - Morro Escuro, triângulo, losango e X - lavras de Ferros, + Talho Aberto.

8.5.1.2. Comportamento dos elementos terras raras (ETR)

Foram selecionadas oito amostras de microclina peritítica para serem analisadas quanto a presença dos ETR. As referidas amostras são procedentes de cinco lavras, sendo duas dos pegmatitos da Generosa, Ponte da Raiz e Talho Aberto, e uma dos corpos do Morro Escuro e Taboca (Tabela 8.6) Nesta tabela foram incluídas as principais razões utilizadas na análise do conteúdo destes elementos.

Amostra	4370fb	4348fr	4590f	4490f	5061fk	4920am	4874am	5107am
La	0,668	0,503	1,386	3,475	3,816	3,928	1,423	1,883
Ce	2,559	3,000	3,168	6,119	4,453	7,899	3,390	4,090
Nd	0,504	0,593	0,662	1,599	1,094	2,181	0,916	1,433
Sm	0,136	0,083	0,167	0,479	0,191	0,649	0,351	0,263
Eu	0,045	0,048	0,065	0,062	0,338	0,049	0,152	0,265
Gd	0,116	0,100	0,150	0,434	0,160	0,704	0,381	0,181
Dy	0,099	0,065	0,244	0,961	0,127	1,280	0,654	0,140
Ho	0,027	0,018	0,059	0,217	0,028	0,296	0,141	0,028
Er	0,112	0,075	0,217	0,710	0,094	0,897	0,431	0,080
Yb	0,148	0,137	0,427	1,383	0,102	0,991	0,435	0,067
Lu	0,033	0,031	0,061	0,166	0,030	0,119	0,059	0,017
(La/Lu)CN	11,49	2,10	1,69	2,36	2,17	13,20	3,426	2,50
Eu/Sm	0,331	0,580	0,390	0,129	1,770	0,076	0,433	1,010
Sm/Nd	0,270	0,140	0,252	0,300	0,175	0,298	0,383	0,184
Σ ETR-TOTAL	4,447	4,653	6,606	15,605	10,433	18,993	8,333	8,447
Σ ETR-L	3,867	4,179	5,383	11,672	9,554	14,657	6,080	7,669
Σ ETR-P	0,526	0,426	1,158	3,871	0,541	4,287	2,101	0,513
Σ ETR-L/ Σ ETR-P	7,35	9,81	4,65	3,02	17,66	3,42	2,89	14,97

TABELA 8.6 - Composição dos feldspatos potássicos nos elementos terras raras. Amostras das lavras Ponte da Raiz, Generosa, Morro Escuro, Talho Aberto e Taboca.

Segundo Möller (1988), nos sistemas graníticos os ETR são preferencialmente alojados em minerais acessórios, a seguir na estrutura das micas e em muito menor quantidade nos feldspatos. Nas fusões silicatadas, altamente polimerizadas, o cátion Eu^{2+} é a forma mais estável, principalmente na presença dos

ânions flúor, fosfato e carbonato. O silicato complexo de európio bivalente assume estrutura anelar que devido à semelhança com a estrutura dos feldspatos pode ser considerada uma sub-unidade dela. Os padrões apresentados para a distribuição dos ETR em minerais de pegmatitos se caracterizam pela presença da anomalia negativa de Eu, enriquecimento nos elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos elementos terras raras pesados (ETRP) ou $(La / Lu)_{CN} > 1$. Henderson (1984) verificou que os padrões de distribuição dos ETR de fusões anatéticas são dificilmente distinguidas das rochas geradoras se a fusão excedeu 10%. Os leucossomas de migmatitos não apresentam anomalia negativa para o Eu, não sendo raro, padrão sem anomalia ou com anomalia positiva (Möller 1988). Por outro lado os feldspatos cristalizados a partir de fusão parcial, dependendo de quão pequena foi esta fração fundida, podem mostrar anomalias positivas de Eu. No Pegmatito de Tin Mountain, amostras de feldspato da zona mural e do início da zona intermédia apresentaram padrão de distribuição dos ETR com anomalia positiva para Eu (Walker et al. 1986). Estes autores interpretaram essa mudança no comportamento da anomalia do Eu como indicativa da mudança na estrutura da fusão (Möller & Muecke 1984), ou na fugacidade do oxigênio (Drake & Weill 1975).

A figura 8.13 mostra os padrões de distribuição dos ETR nos feldspatos estudados. Das três amostras da região de Santa Maria de Itabira duas são provenientes da Lavra Ponte da Raiz (4348fr e 4370fb) e uma da Lavra do Morro Escuro (5061Fk). O valor para Σ_{ETR} tem como intervalo inferior 4,447 e na extremidade superior 18,993, bastante reduzido se comparado com os valores das rochas encaixantes. A representação das curvas para os ETR nestes feldspatos exhibe uma amostra com anomalia negativa, outra com anomalia positiva e a última sem qualquer anomalia. A exposição dessas curvas para as microclinas perfiticas das lavras do Talho Aberto e da Generosa apresentam comportamento ora positivo, ora negativo para a anomalia do Eu. A maior parte das amostras provém da zona intermédia, uma da zona mural e ainda uma procedente de unidade de substituição. Os dados tais como se apresentam só permitem afirmar que estes corpos são anatéticos, outras interpretações serão dadas no capítulo referente à geoquímica.

8.5.2. Composição química da albita

A Tabela 8.7 exhibe os resultados analíticos das seis amostras de albita submetidas a análises químicas, procedentes das lavras da Generosa, Ponte da Raiz e Talho Aberto. O número reduzido de análises é devido a menor proporção na ocorrência deste mineral nos pegmatitos, e ainda ao intenso processo de alteração a

que foram submetidos, transformando-se em caulim. As amostras de feldspato sódico apresentam composição albitica, com teores em percentagem de An inferiores a 5% (Figura 8.5.). Os valores encontrados para os elementos traços analisados mostram similaridade de comportamento com os feldspatos potássicos, segundo descrição detalhada nos parágrafos anteriores e demonstradas pela sequência de figuras, nas quais cinco das amostras ocupam sistematicamente o lado direito dos gráficos devido ao maior teor em SiO_2 . A amostra de albita do Pegmatito do Talho Aberto tem menor conteúdo em sílica, apenas 63,5%, localizando-se portanto na extremidade oposta.

Figura 8.13. Padrões de distribuição dos ETR nos feldspatos potássicos das lavras Ponte da Raiz (círculo amarelo), Morro Escuro (círculo vermelho), Generosa (quadrado), Talho Aberto (triângulo), Taboca (asterisco).

LAVRA	GENEROSA		PONTE	DA RAIZ		TALHO ABERTO
Nº	4473 B	4484 A	4357 FB	4368 FBC	5188 FAB	4917 AB
SiO ₂	68,0	68,7	68,4	67,9	67,7	63,5
Al ₂ O ₃	21,0	0,3	18,8	19,6	19,7	23,4
Fe ₂ O ₃	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
FeO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
CaO	0,10	0,40	0,20	0,26	0,21	0,09
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ O	9,4	9,7	11,6	11,7	11,9	9,2
K ₂ O	0,14	0,31	0,80	0,23	0,15	0,17
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,15	<0,01
TiO ₂	<0,10	<0,10	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,055	0,10	0,022	0,018	0,27	0,023
PF	1,13	0,41				3,63
S. Total	99,88	99,92	99,92	99,97	100,05	100,01
O · F	0,02	0,04	0,01	<0,01	0,01	0,01
S. Final	99,86	99,86	99,91	99,92	99,97	100,00
Fe tt	0,05	0,04	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Th	<10	<10	5	<5	<5	67
Rb	11	6	76	15	17	21
Ba	20	25	77	10	18	29
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	<10	<10	<5	<5	<5	<5
Y	15	19	<5	<3	<3	11
Sr	28	39	78	70	99	35
Nb	<10	15	<5	<5	<5	<5
Cs	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Zr	190	330	20	18	23	13
Li	nd	nd	<5	<5	<5	<5
B	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Pb	nd	nd	91	34	69	46
Si ⁴⁺	2,982	2,998	3,006	2,981	2,974	2,862
Al ³⁺	1,085	1,044	0,974	1,014	1,020	1,243
Ca ²⁺	0,005	0,019	0,009	0,012	0,010	0,004
Na ¹⁺	0,799	0,821	0,989	0,996	1,014	0,804
K ¹⁺	0,008	0,017	0,045	0,013	0,008	0,010
F	0,008	0,014	0,003	0,002	0,004	0,003
Rb ¹⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba ²⁺	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cátions	4,879	4,899	5,023	5,016	5,027	4,923
Carga	15,992	15,986	15,997	15,998	15,996	15,997
Or	1,68	3,37	7,14	2,10	1,43	2,00
Ab	97,34	93,01	91,37	95,92	96,92	97,15
An	0,98	3,63	1,49	2,10	1,65	0,86

TABELA 8.7 - Composição química das amostras de albita com os valores percentuais das moléculas Or-Ab-An. Exemplos procedentes das lavras da Generosa, Ponte da Raiz e Talho Aberto. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 16 átomos de oxigênio por célula unitária. nd = não determinado.

8.6. CONCLUSÕES

Os pegmatitos da porção ocidental da PPO são distinguidos pelos seguintes atributos físicos, químicos e ambientais, apresentados por seus feldspatos:

- Macroscopicamente foram, identificados duas espécies de feldspato: potássico, com coloração bege, branca, rosada e verde (variedade amazonita), geralmente pertitzado e a albita de coloração branca ou incolor (variedade cleavelandita). Há predomínio quantitativo do feldspato potássico sobre o sódico
- Microclina com pertitas do tipo venular e sistema de dupla geminação, albita - periclina, foram observadas ao microscópio.
- Dados da difratometria de raios X indicam $\Delta = 0,72$ a $1,0$ (Goldsmith & Laves 1954). O intervalo para a temperatura de cristalização das albitas na Lavra da Generosa é de 450°C a 600°C (Tolentino Jr. et al. 1988) e de 200°C a 500°C no Pegmatito da Ponte da Raiz, valores obtidos através do gráfico de Mackenzie (1957).
- Análises por espectrometria de absorção no infravermelho identificaram os seguintes fluidos nos feldspatos: água, gás carbônico e metano.
- A partir das análises químicas dos elementos maiores pode-se afirmar que: os feldspatos da área de tese apresentam somente silício e alumínio nas posições tetraédricas, pois os teores em boro, fósforo, ferro férrico e titânio são encontrados abaixo dos limites de detecção para a metodologia empregada. Nas posições M pode-se encontrar o potássio e o sódio, raramente o cálcio, pois na maioria das análises se acha abaixo do nível de detecção, bem como o magnésio.

A percentagem em potássio enquadra estes feldspatos como pertencentes à pegmatitos radioativos, muito raramente potássicos, segundo classificação de Lopes Nunes (1973).

- Dos elementos traços dosados o Ta, Hf, Nb, Li e B foram encontrados abaixo do nível de detecção para os métodos empregados. Os feldspatos analisados se mostram com baixo conteúdo em elementos alcalinos, apresentando razão K /Rb com valores muito próximos daqueles exibidos pelos granitóides. A classificação em ordem crescente do grau de diferenciação dos corpos estudados é a seguinte: lavras de Ferros, de Santa Maria de Itabira, de Rio Piracicaba e finalmente de Sabinópolis.

- O comportamento dos elementos Rb, Cs, Ba, Sr, Pb, e F em relação ao teor de SiO_2 se mostrou muito semelhante ao exibido pelos mesmos elementos dos pegmatitos radioativos de Lopes Nunes (1973).
- A presença e quantidade de Zr e Y nos feldspatos está diretamente relacionada com a presença destes elementos nas rochas encaixantes destes pegmatitos, destacando a Lavra da Generosa como aquela que engloba maiores conteúdos destes elementos.
- Quanto aos ETR, há uma vigorosa redução no Σ_{ETR} dos pegmatitos em relação às rochas encaixantes. Os feldspatos são enriquecidos em ETRL, apresentam anomalia de Eu ora negativa, ora positiva e algumas vezes ausente. Há um maior fracionamento dos ETRL em relação aos pesados. O padrão referido acima para a presença incomum de anomalia positiva para o Eu é característica de pegmatitos e granitos anatóticos.

9. MICAS

Entre os minerais essenciais dos corpos pegmatíticos destacam-se as micas como o terceiro grupo em termos de abundância, seguindo o grupo da sílica e dos feldspatos. Este último grupo mineral foi focalizado no oitavo capítulo, quando constatou-se que, em um grande número de corpos, tanto a microclina como a albita encontram-se parcial ou totalmente alteradas. Entretanto, como as micas também se fazem presentes em todas as etapas da evolução dos corpos pegmatíticos, em diversas espécies, exibindo feições características quanto à composição química, propriedades tipomórficas e associações minerais, elas se prestam de forma excelente na avaliação destas rochas. As espécies individuais são características de diferentes estágios da evolução dos pegmatitos, e sua cristalização, equilíbrio e reações com outros minerais fornecem subsídios para o entendimento das condições físico-químicas reinantes durante o processo de gênese destes corpos. Os elementos traços em micas são utilizados como indicadores do potencial econômico dos pegmatitos parentais, podendo também serem empregados na avaliação de unidades individuais internas destes corpos. O quimismo deste grupo mineral é empregado no enquadramento dos corpos pegmatíticos nas quatro classes propostas por Rudenko et al. (1975) e Ginsburg et al. (1979), classificação esta posteriormente modificada no trabalho de Cerný (1982a). Nos corpos estudados se fazem presentes somente a biotita, único mineral máfico silicatado, e a muscovita.

9.1. ESTRUTURA DAS MICAS

O conhecimento cristaloquímico dos filossilicatos, bem como de suas unidades estruturais, das condições físico-químicas que interferem nas modificações desta estrutura, é fundamentalmente necessário para o entendimento e julgamento dos dados com o objetivo da utilização deles na classificação dos corpos pegmatíticos, e na avaliação da potencialidade econômica da área.

As unidades que participam da estrutura cristalina das micas estão representadas na Figura 9.1. O conjunto de camadas designado pela relação 2:1 é constituído por duas folhas T_2O_5 , na qual as posições T são ocupadas por átomos com coordenação tetraédrica, que podem ser o Si^{4+} , Al^{3+} , B^{3+} , Fe^{3+} e Ti^{4+} , que envolvem uma folha octaédrica intercalada entre elas. A folha octaédrica é a determinante do grupo ao qual a mica pertence. Dioctaédrico, quando o alumínio é o elemento em

coordenação octaédrica com as hidroxilas (folha de gibbsita), ou trioctaédrico se for o magnésio a desempenhar esta função (folha de brucita). Este conjunto de camadas é ligado a um outro semelhante a ele através de cátions interfoliares que apresentam coordenação doze. A simetria principal é monoclínica, gerada pelo empilhamento destas unidades segundo um ângulo $\beta \neq 90^\circ$. O trabalho de Foster (1960) apresenta as substituições que ocorrem nas outras unidades estruturais das micas, além daquelas citadas para a folha tetraédrica.

Figura 9.1 - Aspectos da estrutura cristalina das micas com seus seis politipos superpostos à sua estrutura planar.

A fórmula geral das micas pode ser escrita como:

onde

$X = K^+, Na^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, Rb^+, Cs^+$ e H_2O .

$Y =$ dioctaédricas - $Al^{3+}, Ti^{4+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Li^+, Cr^{3+}$ e V^{3+} .

trioctaédricas - $Mg^{2+}, Al^{3+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}$ e Li^+ .

$T = Si^{4+}, Al^{3+}, Fe^{3+}$.

$W = OH^-, F^-$.

As substituições iônicas ocasionam deformações que podem modificar a estrutura, tanto no que se refere à dimensão quanto à espessura, sendo necessários movimentos de rotação da camada tetraédrica e/ou achatamento da camada octaédrica para acomodar estas variações (McCauley & Newnham 1971; Appelo 1978; Hawthorne & Cerný 1982). Revisões sobre a estrutura e cristaloquímica de micas são encontradas nos trabalhos de Hawthorne & Cerný (1982) e Bailey (1984a e b).

As formas geradas pelas variações no empilhamento das unidades estruturais sucessivas de um cristal de mica são denominadas politipos, que segundo Smith & Yoder (1956) podem ser no máximo em número de seis. O símbolo do politipo indica o número de camadas e a simetria da estrutura. Na Figura 9.1 estão representados os seis politipos, superpostos à estrutura planar das micas. A identificação destes politipos pode ser realizada através da difração de raios X em um cristal único, ou pelo método do pó. Esta última metodologia não faz distinção entre os politipos 1M e 3T que têm maior ocorrência nas micas do grupo trioctaédrico. A forma politípica de maior frequência na muscovita é a 2M₁, enquanto na biotita é o 1M. Yoder & Eugster (1955) relacionaram as principais reflexões, características dos diversos politipos, obtidas pelo método do pó, e Lopes Nunes (1973) sistematizou-as no intuito de facilitar a identificação destes politipos. A Tabela 9.1 exhibe as principais características que devem ser notadas na análise dos difratogramas dos diferentes politipos, bem como em suas mais comuns associações.

Politipo	Reflexões (°) (hkl)			
2M ₁	3,73 (023)	3,50 (11 $\bar{4}$)	3,20 (114)	2,99 (025)
1M	3,66 (11 $\bar{2}$)	3,08 (112)		
2M ₂	3,73 (023)			2,99 (025)
1M+2M ₂	3,73 (023)	2,90 e 2,89 (11 $\bar{3}$) e (115)	2,86 (115)	2,99 (025)
1M+2M ₁	3,73 (023)	2,90 e 2,89 (11 $\bar{3}$) e (115)		2,99 (025)

Tabela 9.1 - Valores de d em Å para os principais planos (hkl), característicos de cada um dos politipos mais comuns. Na identificação o quadro claro indica reflexão que deve estar presente no diagrama; quadro escuro para aquelas que devem estar ausentes e quadro de coloração cinza para aquelas pouco nítidas.

A observação dos dados contidos nesta tabela permite concluir que o politipo 2M₂ não possui reflexões características, que possam identificá-lo. A distinção

entre ele e o politipo 2M₁ está baseada na ausência de duas das reflexões que caracterizam este último politipo (Munoz 1968).

Além dos politipos relacionados na tabela abaixo há aqueles que mostram uma desorganização no empilhamento, e que são denominados 1Md. O interesse em estudar os politipos de mica reside na possibilidade de se estabelecer comparações entre as diversas amostras e às prováveis condições de temperatura, pressão e composição química delas, ou mesmo do pegmatito.

9.2. ASPECTOS MORFOLÓGICOS

A faixa coberta pelos pegmatitos estudados neste trabalho é conhecida desde a década de quarenta como região caracterizada pela ocorrência de berilo na variedade água marinha e também como produtora de minerais industriais, dentre eles as micas (Pecora et al. 1949). Os mapas metalogenéticos e de recursos minerais das folhas Ipatinga e Guanhões nas listagens de ocorrências, fazem referências às micas e outros bens minerais como feldspatos e caulim (Drumond 1985, Vieira 1985).

As espécies de micas desta região são representadas pela biotita e pela muscovita. Esta última, a mais abundante, com ocorrência generalizada nos pegmatitos da área, sendo encontrada em todas as zonas dos pegmatitos, principalmente nas porções mais altas, enquanto a biotita se restringe à zona marginal e muito raramente aparece na zona mural. Na lavra do Silivano os exemplares de 4 a 6cm apresentam-se como livros, com forma euédrica enquanto os cristais maiores são subédricos. Na Lavra da Generosa os cristais mais desenvolvidos alcançam as dimensões de 60-80cm X 30-40cm de área, com forma subédrica de prisma curto. O volume de muscovita desta lavra é muito grande, entretanto o hábito mais comum, das maiores placas, é aquele denominado "rabo de peixe" que possui menor valor comercial. Neste mesmo pegmatito há ocorrência de muscovita com hábito lamelar de folhas contínuas nos cristais euédricos a subédricos, de dimensões intermediárias e menores. O hábito maciço, é mais raro, ocorrendo em exemplares totalmente anédricos associados aos corpos de substituição. Os cristais de muscovita, em geral apresentam-se com dimensões que vão de 5cm X 3cm a 20cm X 14cm (Fotografia 9.1). A biotita mostra-se na maioria das vezes com forma subédrica a anédrica, em cristais alterados, em intercrescimento com muscovita ou ainda associada à muscovita e caulinita. O estado de alteração da biotita foi o responsável pela escolha da muscovita como material a ser datado, como explicado no Capítulo 7.

FOTOGRAFIA 9.1 - Cristal de muscovita da Lavra da Generosa apresentando o hábito denominado “rabo de peixe”, característico dos cristais desta mina.

9.3. ESTUDOS POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

As análises por difração de raios X foram utilizadas, inicialmente na identificação das formas politípicas, relacionando-as às suas zonas de ocorrência. Para alcançar os objetivos propostos foram analisadas 36 amostras procedentes da Lavra da Ponte da Raiz, 24 da Lavra do Talho Aberto, 15 da Lavra da Generosa, 7 da Lavra do Pé da Serra, e 1 ou 2 amostras de cada um dos demais corpos cadastrados. O politipo de maior frequência encontrado nas amostras de muscovita foi o $2M_1$. A caracterização politípica da biotita só é conseguida através da análise de cristal único. Os espectros obtidos neste trabalho foram processados pelo método do pó, logo a distinção entre os politipos 1M e 3T será alcançada através da análise de espectrografia de absorção no infravermelho (Lopes Nunes 1973, Marciano 1985). Duas amostras procedentes dos corpos de substituição do Pegmatito da Ponte da Raiz apresentaram reflexões do politipo $2M_1$ associadas ao politipo 1M. O diagrama de outra amostra, retirada da Zona Intermédia, deste mesmo pegmatito, mostrou esta mesma associação. Amostras de biotita exibiram a associação entre os politipos 1M e $2M_1$. Poucas foram as análises que apresentaram configuração politípica 1Md, tanto entre as amostras de muscovita como de biotita.

A associação politípica $2M_1+1M$ em muscovitas foi encontrada em amostras dos corpos de substituição dos pegmatitos de Governador Valadares (Marciano 1985). Os resultados analíticos apresentados por Lopes Nunes (1973) para as amostras dos pegmatitos radioativos e potássicos indicam somente a presença do politipo $2M_1$. Segundo Yoder & Eugster (1955) esta forma é mais estável, do que as demais, em temperaturas elevadas. O limite superior de estabilidade da muscovita sintética é representado pela curva onde a temperatura de 625°C é alcançada sob uma pressão de água de 5.000 bares, 665°C quando a pressão é de 15.000 bares e finalmente de 715°C à pressão de 30.000 bares. Pode-se sugerir como prováveis causas da associação $2M_1+1M$, à variação na composição química, provocada pelo processo de metassomatismo desenvolvido entre as zonas primárias já cristalizadas e as unidades de substituição, quando há possibilidade de serem introduzidos na estrutura da muscovita, elementos químicos com raios iônicos diferentes dos usuais como substitutos ou ocupantes de sítios vazios (Foster 1960, Giese Jr. 1984), e/ou um maior conteúdo em elementos incompatíveis como os ETR, e/ou ainda um maior conteúdo de elementos da fase fluida. Um outro fator que não deve ser negligenciado é a variação da temperatura e da viscosidade do sistema pegmatítico residual. As amostras de biotita, quando observadas sob a lupa, apresentaram pequenos cristais de muscovita, o que explicita a associação encontrada. Os dados referentes à geometria da célula unitária serão apresentados no capítulo referente à evolução interna dos corpos pegmatíticos, quando poderão ser analisados devidamente.

9.4. ESTUDOS POR ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

Esta metodologia foi empregada por Marciano (1985) nas amostras dos pegmatitos de Governador Valadares, tendo sido testadas, nesta oportunidade, várias correlações citadas pela literatura, como por exemplo, a interferência produzida nas bandas de absorção a 543cm^{-1} e 935cm^{-1} provocadas pela substituição do Mg pelo Al^{VI} na camada octaédrica (Stubican & Roy 1961). Trabalho específico de síntese sobre a absorção no infravermelho pelos filossilicatos é apresentada por Van der Marel & Beutelspacher (1976). As obras de Moenhe (1962), Farmer (1974) e Gadsden (1975) são referências indispensáveis para o trabalho desenvolvido através da utilização desta metodologia.

A utilização desta metodologia analítica no presente trabalho visou a obtenção de dados que não poderiam ser conseguidos através da difratometria de raios X, como a caracterização da fase fluida dos minerais do grupo das micas, e a identificação do politipo da biotita que ocorre nestes pegmatitos.

Os componentes fluidos detectados através destas análises apresentam bandas de absorção no intervalo compreendido entre 4000cm^{-1} e 1630cm^{-1} . A água exibindo banda de estiramento em 3420cm^{-1} e de deformação em 1630cm^{-1} é o maior constituinte da fase fluida destes minerais. O CO_2 mostra uma banda de absorção pouco desenvolvida em 2330cm^{-1} , enquanto o CH_4 apresenta uma banda dupla em 2920 e 2840cm^{-1} . A ocorrência destes dois últimos compostos químicos como componentes da fase fluida é limitada a alguns espectros. Análise realizada através da espectrografia microraman em inclusões fluidas de quartzo de veios pegmatíticos da localidade de Vila Esperança, em Ferros não constatou a presença de metano, somente a da água e do gás carbônico (Bilal et al. 1995).

O politipo encontrado em todas as amostras de biotita é 1M pois os espectros de absorção no infravermelho não apresentam a banda em 760cm^{-1} definida por Vedder (1964) como característica do politipo 3T. Por outro lado, a presença do patamar (ombro) a 673cm^{-1} que ocorre em todos os diagramas identifica o politipo 1M.

9.5. QUIMISMO DAS MICAS

A abordagem deste item será desenvolvida de forma semelhante àquela apresentada no capítulo 8, referente aos feldspatos, pois assim, haverá uma maior facilidade, em se estabelecer ligações entre os dados de diferentes grupos e espécies minerais, que serão utilizados para as interpretações de índole geoquímica e do processo evolutivo da cristalização dos pegmatitos estudados.

As análises químicas das amostras de muscovita são exibidas na Tabela 9.2 e aquelas referentes aos dados da biotita são mostradas na Tabela 9.2.A. O teor em P_2O_5 está abaixo do limite de detecção da metodologia empregada na análise.

Na muscovita, a relação entre a percentagem de SiO_2 e os elementos maiores não é discriminativa como nas análises dos feldspatos, pois os dados se apresentam dispersos, não ocorrendo possibilidade de correlação entre os valores encontrados para os diferentes elementos e os vários corpos amostrados. A Figura 9.2 que expressa a relação Zr/SiO_2 é um exemplo deste comportamento. Destaque deve ser dado à Lavra da Generosa, que de forma antagônica, exibe o conjunto de dados mais homogêneo.

As razões utilizadas como indicadoras do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos são apresentadas na Tabela 9.3. e 9.4, para a muscovita e biotita, respectivamente. Dentre os tipos de pegmatitos a elementos raros, existem dois que se identificam com estes da borda ocidental da PPO, pela sua mineralogia, porém os

Lavra	Generosa							Brejaúba		Silivano	
Nº	4469	4471a	4471	4547	4596	4608	4571	5103	5105B	5121	5131
	Mi	Mos	Mos	A-Mos	Mos	Mos	Mos	Mos	Mos	Mos	Mos
SiO ₂	44,9	48,2	47,9	45,5	45,2	46,0	45,6	45,4	44,5	45,1	46,1
Al ₂ O ₃	30,9	28,8	28,9	30,3	31,4	31,3	29,0	31,9	33,4	28,8	26,0
Fe ₂ O ₃	3,3	2,6	2,6	3,4	2,9	2,6	2,6	3,5	4,0	4,6	3,5
FeO	2,7	3,6	3,5	2,7	2,7	3,3	5,1	2,1	0,49	3,3	4,5
CaO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,13	0,75	0,31	2,1
Na ₂ O	0,55	1,5	1,8	0,57	0,41	0,30	0,25	0,47	0,59	0,34	0,34
K ₂ O	10,6	9,4	9,5	10,8	10,1	10,6	10,5	10,1	10,3	10,1	9,8
MnO	0,27	0,20	0,20	0,32	0,24	0,28	0,40	0,43	0,03	0,14	0,20
TiO ₂	0,16	0,25	0,25	0,18	0,17	0,16	0,24	0,19	0,53	0,43	0,62
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,90	1,1	1,2	1,0	2,1	1,2	2,2	0,13	0,19		
PF	0,537	4,05	4,02	5,04	4,99	4,17	3,99	5,12	5,27	5,07	3,81
Σ Total	99,85	99,70	99,87	99,81	100,27	99,91	99,88	99,47	100,05	99,79	99,97
O≡F	0,38	0,46	0,51	0,42	0,88	0,51	0,93	0,05	0,08	0,67	1,26
Σ Final	99,47	99,24	99,36	99,39	99,39	99,40	99,95	99,42	99,97	99,12	98,71
Fett	4,41	4,62	4,54	4,48	4,13	4,39	5,78	4,08	3,18	5,19	5,95
Cl	32	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	24	<20	30
Th	7	<7	8	5	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10
Rb	2690	1750	1750	3190	3480	2490	3740	4450	280	3280	4130
Ba	51	76	81	39	30	55	56	61	530	160	310
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	39	31	50	71	74	53	95	160	<10	42	29
Y	24	50	56	6	<5	18	17	<5	<5	<5	9
Sr	11	11	11	12	9	9	14	13	<5	10	11
Nb	210	250	240	180	210	200	150	180	100	310	340
Cs	15	39	26	21	40	32	92	190	<5	28	95
Cs	10	15	18	14	8	14	11	<5	13	6	8
Li	978	1156	1111	1111	1034	813	1491	793	108	734	2069
B	10	<10	<10	<10	32	<10	12	86	23	14	29
Si ⁴⁺	3,055	3,305	3,291	3,107	3,088	3,159	3,200	3,064	2,971	3,109	3,264
Al ^{IV}	0,945	0,695	0,709	0,893	0,912	0,841	0,800	0,936	1,029	0,891	0,736
Al ^{VI}	1,533	1,632	1,631	1,546	1,616	1,693	1,598	1,601	1,599	1,449	1,433
Ti ⁴⁺	0,008	0,150	0,150	0,108	0,102	0,096	0,144	0,144	0,318	0,022	0,033
Fe ³⁺	0,169	0,134	0,134	0,175	0,149	0,134	0,137	0,178	0,201	0,239	0,186
Fe ²⁺	0,154	0,206	0,201	0,154	0,154	0,190	0,299	0,119	0,027	0,190	0,266
Mn ²⁺	0,016	0,012	0,012	0,019	0,014	0,016	0,024	0,025	0,002	0,008	0,012
Mg ²⁺	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,013	0,075	0,032	0,222
K ⁺	0,920	0,822	0,833	0,941	0,880	0,929	0,940	0,869	0,877	0,888	0,885
Na ⁺	0,073	0,199	0,240	0,075	0,054	0,040	0,054	0,061	0,076	0,045	0,047
F ⁻	0,194	0,239	0,261	0,216	0,454	0,261	0,488	0,028	0,040	0	0
OH ⁻	2,438	1,852	1,842	2,296	2,274	1,910	1,868	2,305	2,347	2,331	1,799
Cátions	9,324	8,884	8,916	9,228	9,164	8,934	8,946	9,183	9,234	9,208	8,886
Carga	23,806	23,721	23,739	23,784	23,546	23,739	23,512	23,972	23,960	24,000	24,000

TABELA 9.2 - Composição química de muscovitas das lavras da Generosa e Brejaúba. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 24 oxigênios ou cargas negativas.

	Ponte da Raiz					Morro Escuro				Salto	
Nº	4321 MM1	4336 M	4375 MM2	5188 Mos	4340 Mos	5005 Mi	5009 Mos	5064 Mos	5065 Mos	5043 Mos	5057 Mos
SiO ₂	45,7	47,1	45,9	44,2	45,2	45,1	45,3	45,1	46,1	45,4	44,9
Al ₂ O ₃	29,5	29,6	30,8	36,9	31,0	30,4	33,6	30,6	31,0	33,2	31,4
Fe ₂ O ₃	4,8	4,0	4,2	1,3	3,6	4,4	3,3	3,9	3,9	4,2	4,8
FeO	1,4	0,85	1,8	0,28	1,6	1,7	0,42	2,1	1,8	0,63	0,56
CaO	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	0,05	<0,05	<0,05
MgO	1,3	0,81	0,33	<0,10	<0,10	<0,10	0,36	0,18	0,97	0,19	0,38
Na ₂ O	0,59	0,51	0,46	0,82	0,47	0,78	0,43	0,62	0,46	0,55	0,65
K ₂ O	10,7	10,3	10,7	10,9	10,1	10,7	11,5	10,7	10,3	10,2	10,8
MnO	0,26	0,34	0,49	0,06	0,58	0,42	0,11	0,40	0,13	0,06	0,04
TiO ₂	0,50	0,37	0,33	<0,05	0,29	0,32	0,15	0,28	0,59	0,19	0,38
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,80	0,87	0,50	0,55	1,3	0,92	0,29	0,90	0,16	0,37	0,14
PF	4,49	5,36	4,42	4,96	5,73	5,08	4,49	5,18	4,30	4,85	5,31
Σ Total	100,04	100,11	99,98	99,97	99,95	99,82	99,95	99,96	99,76	99,84	99,87
O≡F	0,34	0,37	0,21	0,23	0,55	0,39	0,12	0,38	0,07	0,16	0,06
Σ Final	99,70	99,74	99,77	99,74	99,40	99,43	99,83	99,58	99,60	99,68	99,81
Fett	4,45	3,46	4,34	1,13	3,76	4,40	2,64	4,36	4,13	3,43	3,80
Th	<5	<5	<5	<5	<10	<5	<5	<5	<10	<10	<5
Rb	1340	1380	2000	1020	4080	2020	1160	1690	1320	2650	1000
Ba	49	170	190	83	46	30	120	48	200	20	82
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	91	76	84	12	210	90	18	78	46	94	37
Y	7	8	16	9	<5	13	31	16	27	<5	11
Sr	12	14	10	94	11	8	40	8	10	9	7
Nb	350	300	260	10	77	230	31	200	160	350	480
Cs	17	30	26	30	190	47	270	39	19	67	<5
Zr	22	18	15	11	<5	14	16	15	6	6	22
Li	340	306	253	26	406	608	38	291	505	19	22
B	<10	10	10	32	40	14	70	<10	24	63	<10
Pb											
Cl	<20	<20	<20	<20	<20	27	<20	<20	<20	<20	35
Si ⁴⁺	3,124	3,160	3,129	2,947	3,051	3,076	3,058	3,070	3,129	3,049	3,032
Al ^{IV}	0,876	0,840	0,871	1,053	0,949	0,924	0,942	0,930	0,871	0,951	0,968
Al ^{VI}	1,501	1,501	1,604	1,846	1,517	1,520	1,731	1,525	1,609	1,677	1,531
Ti ⁴⁺	0,026	0,019	0,017	0,003	0,015	0,016	0,008	0,014	0,030	0,010	0,019
Fe ³⁺	0,247	0,202	0,215	0,065	0,183	0,226	0,168	0,200	0,199	0,212	0,244
Fe ²⁺	0,080	0,048	0,103	0,016	0,090	0,097	0,024	0,120	0,102	0,035	0,032
Mn ²⁺	0,015	0,019	0,028	0,003	0,033	0,024	0,006	0,023	0,007	0,003	0,002
Mg ²⁺	0,132	0,081	0,034	0,010	0,010	0,010	0,036	0,018	0,098	0,019	0,038
K ⁺	0,933	0,882	0,931	0,927	0,870	0,931	0,990	0,929	0,892	0,874	0,930
Na ⁺	0,078	0,066	0,061	0,106	0,062	0,103	0,056	0,082	0,061	0,072	0,085
F ⁻	0,173	0,185	0,108	0,116	0,277	0,198	0,062	0,194	0,034	0,079	0,030
OH ⁻	2,048	2,399	2,010	2,206	2,580	2,311	2,022	2,352	1,947	2,172	2,392
Cátions	9,063	9,219	9,005	9,184	9,361	9,241	9,044	9,266	8,947	9,077	9,277
Carga	23,827	23,815	23,892	23,884	23,723	23,802	23,938	23,806	23,966	23,921	23,970

Tabela 9.2 - Composição química de muscovitas das lavras da Ponte da Raiz, Morro Escuro e Salto. O n° de átomos por célula unitária foi calculado na base de 24 O₂ ou cargas negativas.

Lavra	Taboca	Arruda	Marilene	Cafezeiro	Olimpio	Cheira Pau	Sr. Saulo	Ferros	Ivalde
N°	5108	5125	5190	5196	5159	5162	5184	5016	5112
SiO ₂	45,4	45,1	45,2	46,1	45,3	45,1	43,3	45,5	44,6
Al ₂ O ₃	34,0	33,4	33,3	29,1	30,3	32,9	31,6	31,7	33,1
Fe ₂ O ₃	3,3	2,7	2,7	4,3	5,0	2,7	4,8	4,5	3,9
FeO	0,91	1,2	0,55	2,9	1,6	0,71	0,42	0,71	0,91
CaO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO	0,38	0,77	1,2	0,35	0,10	1,0	0,73	0,41	0,30
Na ₂ O	0,60	0,63	0,40	0,27	0,57	0,72	0,88	0,66	0,53
K ₂ O	10,2	10,2	10,7	10,5	9,6	10,9	10,3	10,5	10,1
MnO	0,03	0,07	0,01	0,40	0,45	0,02	0,15	0,12	0,06
TiO ₂	0,10	0,32	0,55	0,46	1,4	0,30	0,45	0,20	0,27
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	0,41	1,2	0,14	0,98	0,54	0,19	0,82	0,32	0,50
PF	4,72	4,67	5,02	4,50	6,20	5,30	6,63	5,12	5,53
Σ Total	100,50	100,25	99,77	99,86	99,80	99,84	100,08	99,74	99,80
O≡F	0,17	0,51	0,06	0,41	0,23	0,08	0,35	0,14	0,21
Σ Final	99,88	99,75	99,71	99,45	99,57	99,76	99,73	99,60	99,59
Fett	3,02	2,82	2,32	5,26	4,74	2,44	3,69	3,70	3,44
Th	<10	<10	8	<5	7	<5	<5	6	<10
Rb	1960	1330	460	1190	2240	630	1410	2180	2730
Ba	25	150	130	120	19	31	44	27	<15
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	29	56	<5	26	37	30	26	75	150
Y	<5	<5	25	33	<5	<5	10	11	<5
Sr	8	9	9	8	7	6	5	7	10
Nb	620	620	200	240	230	310	500	330	390
Cs	23	21	<5	120	30	<5	11	56	100
Zr	7	12	25	20	15	23	22	15	<5
Li	113	375	<10	<10	117	20	225	40	201
B	26	22	16	351	<10	<10	18	17	60
Cl	<20	<20	25	<20	<20	23	<20	<20	26
Si ⁴⁺	3,042	3,044	3,022	2,169	2,999	3,017	2,893	3,063	2,985
Al ^{IV}	0,958	0,956	0,978	0,831	1,001	0,983	1,107	0,937	1,015
Al ^{VI}	1,727	1,701	1,646	1,527	1,363	1,611	1,381	1,578	1,596
Ti ⁴⁺	0,005	0,016	0,028	0,024	0,070	0,015	0,023	0,010	0,014
Fe ³⁺	0,166	0,137	0,136	0,222	0,249	0,136	0,241	0,228	0,196
Fe ²⁺	0,051	0,068	0,031	0,167	0,089	0,040	0,023	0,040	0,051
Mn ²⁺	0,002	0,004	0,001	0,023	0,025	0,001	0,008	0,007	0,003
Mg ²⁺	0,038	0,077	0,120	0,036	0,010	0,100	0,063	0,041	0,030
K ⁺	0,872	0,878	0,913	0,921	0,811	0,930	0,878	0,902	0,862
Na ⁺	0,078	0,082	0,052	0,036	0,073	0,093	0,114	0,086	0,069
F ⁻	0,087	0,256	0,030	0,213	0,113	0,040	0,173	0,068	0,106
OH ⁻	2,110	2,103	2,239	2,064	2,738	2,365	2,955	2,299	2,469
Cátions	9,052	9,070	9,168	9,023	9,431	9,293	9,689	9,194	9,293
Carga	23,913	23,744	23,970	23,787	23,887	23,960	23,827	23,932	23,894

Tabela 9.2 - Composição química de muscovitas das lavras que ocorrem no Município de Ferros, MG. O número de átomos por célula foi calculado na base de 24 oxigênios ou carga negativa.

Lavra	Talho Aberto		Pé da Serra		Rio Piracicaba	Euxenita		Serra Azul		S. Antônio Iambé	
Nº	4918 Mos	4869 Mos	4847 Mos	5073 Mos	4932 Mos	3875 Mos	4827 Mos	4822 Mos	5152 Mos	4149 Mos	5140 Mos
SiO ₂	46,0	48,2	45,4	44,4	45,3	44,3	45,7	45,5	45,1	45,3	44,9
Al ₂ O ₃	28,1	26,2	31,4	37,0	28,9	31,1	34,5	32,6	33,4	33,5	30,2
Fe ₂ O ₃	3,4	3,0	3,1	0,25	6,5	5,1	1,5	3,2	3,1	3,1	4,8
FeO	5,0	5,0	1,3	0,28	0,71	0,71	0,42	0,28	0,56	0,63	2,2
CaO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
MgO	<0,10	0,13	0,67	<0,10	0,76	0,92	0,81	0,94	1,2	1,2	0,16
Na ₂ O	0,23	0,22	0,49	0,37	0,55	0,74	0,81	0,78	0,57	0,59	0,54
K ₂ O	10,4	11,3	10,3	11,3	10,8	10,4	10,6	10,6	10,4	10,5	10,8
MnO	0,29	0,27	0,14	0,20	0,07	0,10	0,02	0,11	0,07	0,08	0,31
TiO ₂	0,42	0,35	0,21	<0,05	0,39	0,63	0,47	0,18	0,34	0,33	0,12
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
F	2,1	1,3	2,1	0,70	0,95	0,28	0,13	0,26	0,20	0,37	1,1
PF	3,99	3,68	5,46	5,59	5,10	5,50	4,94	5,42	4,98	4,50	4,96
Σ Total	99,93	99,95	100,63	100,09	100,03	99,78	99,90	99,87	99,92	100,0	100,09
O=F	0,88	0,55	0,88	0,30	0,40	0,12	0,06	0,11	0,08	0,16	0,46
Σ Final	99,05	99,10	99,75	99,79	99,63	99,66	99,84	99,76	99,84	99,94	99,63
Fett	6,27	5,99	3,18	0,39	5,10	4,12	1,38	2,46	2,61	2,66	5,07
Th	<10	<5	<10	<5	<5	<5	<5	6	<10	<10	6
Rb	1960	2240	1920	950	1150	2100	580	1930	660	730	1760
Ba	25	210	61	66	160	49	260	14	71	66	150
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	29	66	46	<5	25	70	5	190	17	19	46
Y	<5	36	<5	5	6	<3	<5	6	<5	<5	8
Sr	8	9	7	14	10	8	14	8	7	13	8
Nb	620	120	350	9	260	370	87	310	270	290	140
Cs	23	260	26	24	<5	81	<5	240	6	10	45
Zr	7	14	11	17	18	20	20	16	18	18	15
Li	113	915	554	24	291	157	52	131	188	348	684
B	26	22	65	150	17	30	17	53	63	63	15
Pb											
Cl	<20	<20	<20	<20	35	21	<20	<20	<20	<20	<20
Si ⁴⁺	3,228	3,382	3,066	2,937	3,090	2,984	3,038	3,034	3,015	3,044	3,076
Al ^{IV}	0,772	0,618	0,934	1,063	0,910	1,016	0,962	0,966	0,985	0,956	0,924
Al ^{VI}	1,552	1,548	1,565	1,821	1,413	1,453	1,741	0,634	1,647	1,697	1,514
Ti ⁴⁺	0,022	0,018	0,011	0,002	0,020	0,032	0,023	0,009	0,017	0,017	0,006
Fe ³⁺	0,180	0,158	0,158	0,012	0,334	0,259	0,075	0,161	0,156	0,157	0,247
Fe ²⁺	0,293	0,293	0,073	0,015	0,040	0,040	0,023	0,016	0,031	0,035	0,126
Mn ²⁺	0,017	0,016	0,008	0,011	0,004	0,006	0,023	0,016	0,031	0,035	0,126
Mg ²⁺	0,010	0,014	0,067	0,010	0,077	0,092	0,080	0,093	0,120	0,120	0,016
K ⁺	0,931	1,011	0,887	0,953	0,940	0,894	0,899	0,902	0,887	0,900	0,944
Na ⁺	0,031	0,030	0,064	0,047	0,073	0,097	0,104	0,101	0,174	0,077	0,072
F ⁻	0,466	0,288	0,449	0,146	0,205	0,060	0,027	0,055	0,042	0,079	0,238
OH ⁻	1,868	1,722	1,722	2,466	2,320	2,471	2,191	2,411	2,221	2,017	2,266
Cátions	8,908	8,815	9,296	9,342	9,224	9,347	9,142	9,298	9,160	9,027	9,212
Carga	23,534	23,712	23,551	23,854	23,795	23,940	23,973	23,945	23,958	23,921	23,762

Tabela 9.2 - Composição química de muscovitas das lavras da região sul e da região norte da área estudada. O número de átomos por célula unitária foi calculado na base de 24 átomos de oxigênio ou cargas negativas.

Lavra	Salto		Ivalde	S. Antônio Itamb	Sr. Josias	Amélio Rodrigues	Sr. Saulo	Morro Escuro	Brejaúba	Taboca	Silivano	Euxenita	
Nº	5045	5055	5117	5142	5173	5181	5183	5005	5104	5109	5129	3870	4830
SiO ₂	34,7	34,9	35,2	35,3	34,3	33,7	34,4	36,3	35,9	35,3	36,4	36,6	35,8
Al ₂ O ₃	17,9	17,5	18,3	19,7	14,5	15,1	15,5	17,2	17,1	16,2	17,6	17,7	16,3
Fe ₂ O ₃	9,2	10,5	9,9	7,7	8,4	14,3	12,6	6,0	8,0	9,2	17,1	8,1	9,4
FeO	13,9	13,9	12,5	19,7	19,2	12,9	10,5	16,7	17,6	16,1	4,9	15,0	15,7
CaO	0,07	<0,05	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,08
MgO	6,4	5,4	6,7	1,3	5,8	4,6	7,8	5,9	3,9	5,4	6,2	5,3	5,6
Na ₂ O	0,22	0,07	0,13	0,17	0,16	0,19	0,17	0,20	0,08	0,04	0,14	0,18	0,13
K ₂ O	9,5	9,2	9,3	9,2	9,5	9,6	9,6	9,5	8,5	9,3	6,1	8,4	9,1
MnO	0,64	0,70	0,41	1,1	0,86	1,1	0,75	0,61	0,68	0,64	0,30	0,72	0,77
TiO ₂	2,7	2,8	2,6	1,8	2,8	3,2	2,9	2,2	2,7	2,8	1,8	3,4	3,4
P ₂ O ₅	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,05
F	0,13	0,80	0,14	0,18	1,3	0,95	1,4	2,3	1,1	1,0	2,2	0,08	0,52
H ₂ O ⁺	2,88	4,43	2,93	1,02	1,60	3,23	3,78	3,69	4,60	4,15	7,61	4,02	3,25
ΣTotal	98,24	100,24	98,17	97,17	98,41	98,87	99,40	100,81	100,29	100,22	100,55	100,33	100,20
O=ΣF	0,05	0,34	0,06	0,08	0,55	0,40	0,59	0,97	0,46	0,42	0,93	0,34	0,22
ΣFinal	98,19	99,90	98,11	97,09	97,87	98,47	98,81	99,84	99,83	99,80	99,62	99,99	99,98
Fett	17,23	18,14	16,64	20,70	20,79	20,03	16,97	17,18	19,28	18,94	15,77	17,33	18,77
Th	<10	<5	<10	<10	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<10	<10
Rb	630	590	640	1580	750	550	700	990	610	750	1880	720	860
Ba	340	360	380	240	1180	280	270	330	290	180	730	570	240
Hf	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8	<8
Ta	15	12	13	210	13	24	8	42	18	10	14	12	12
Y	19	64	15	16	17	14	30	21	450	160	270	33	41
Sr	11	<5	10	6	5	<5	<5	5	<5	5	9	10	9
Nb	230	210	220	230	140	190	190	150	200	190	390	150	240
Cs	23	35	14	580	310	13	62	79	130	46	37	42	93
Zr	20	23	32	5	20	22	23	23	31	54	24	29	37
Li	447	120	726	1517	384	211	344	640	390	270	610	330	300
B	18	17	<10	14	<10	<10	<10	17	14	18	11	<10	<10
Cl	120	210	180	440	54	88	170	120	35	170	230	71	44
Si ^{iv}	2,72	2,65	2,73	2,91	2,85	2,68	2,67	2,81	2,74	2,72	2,59	2,77	2,77
Al ^{iv}	1,28	1,35	1,27	1,09	1,15	1,32	1,33	1,19	1,26	1,28	1,41	1,23	1,23
Al ^{vi}	0,37	0,22	0,41	0,82	0,23	0,10	0,09	0,38	0,28	0,19	0,06	0,34	0,26
Fe ³⁺	0,54	0,60	0,58	0,48	0,53	0,86	0,74	0,35	0,46	0,53	0,91	0,46	0,55
Fe ²⁺	0,91	0,88	0,81	1,36	1,34	0,86	0,68	1,08	1,12	1,04	0,29	0,95	1,02
Mg ²⁺	0,75	0,61	0,78	0,16	0,72	0,55	0,90	0,68	0,44	0,62	0,66	0,60	0,65
Ti ⁴⁺	0,16	0,16	0,15	0,11	0,18	0,19	0,17	0,13	0,16	0,16	0,10	0,19	0,20
Mn ²⁺	0,04	0,05	0,03	0,08	0,06	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04	0,02	0,05	0,05
Na ⁺	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02
K ⁺	0,95	0,89	0,92	0,97	1,01	0,98	0,95	0,94	0,83	0,91	0,55	0,81	0,90
F ⁻	0,03	0,19	0,03	0,05	0,34	0,24	0,34	0,56	0,27	0,24	0,49	0,02	0,13
H ⁺	1,51	2,25	1,52	0,56	0,89	1,72	1,96	1,91	2,34	2,13	3,61	2,03	1,68
Cations	9,27	9,68	9,22	8,56	8,98	9,35	9,55	9,54	9,69	9,64	10,21	9,45	9,31
Carga	23,97	23,81	23,97	23,95	23,66	23,76	23,66	23,44	23,73	23,76	23,51	23,98	23,87

Tabela 9.2A - Composição química das amostras de biotita da área de tese. Número de átomos por célula unitária, calculado na base de 24 átomos de oxigênios e/ou cargas negativas

Figura 9.2 Distribuição do Zr em amostras de muscovita procedentes da borda ocidental da PPO. A dispersão é muito alta para valores muito baixos em zircônio

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)		Silivano (SIL)
TA		SAL		SIL
○ 4847-MOS	PE da Serra (PES)	■ 5108-MOS	Taboca	GEN*
○ 5073-MOS	PES	■ 5125-MOS	Arruda	GEN*
○ 4932-MOS	Rio Piracicaba	■ 5190-MOS	Marilene	GEN*
	Euxenita (EUX)	■ 5196-MOS	Cafezeiro	
	EUX	■ 5159-MOS	Sr. Olimpio	
□ 4822-MOS	Serra Azul (SA)	■ 5162-MOS	Cheira Pau	
□ 5252-MOS	SA	■ 5184-MOS	Sr Saulo	
□ 4149-MOS	SA	■ 5016	Ferros	
□ 5140-MOS	S. Antonio Itambe	■ 5112-MOS	Ivalde	
	Ponte da Raiz (PR)	▲ 4469-MI	Generosa (GEN)	
	PR	▲ 4471A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4471-MOS	Gen	
	PR	▲ 4547A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4596-MOS	Gen	
▲ 5005-MI	Morro Escuro (ME)	▲ 4608-MOS	Gen	
▲ 5009-MOS	ME	▲ 4571-MOS	Gen	
▲ 5064-MOS	ME		Brejauba (BREJ)	
▲ 5065-MOS	ME		BREJ	

GEN*-Dados de Wener (1983).

valores calculados para as razões Rb/Cs e Nb/Ta são muito menores naqueles do que nestes, sendo o intervalo bem mais reduzido.

Borda ocidental da PPO

Tipo Terras rara

Tipo berilo

Rb/Cs 8,4 - 230

32 - 12

~18

Nb/Ta 1,13 - 40

6 - 1,7

3,3 -1,4

Nº Amostra	4918 TA	4869 TA	4847 PES	5073 PES	4932 RPIR	3875 EUX	4827 EUX	4822 SA	5152 SA	4149 SA	5140 SAI
K/Rb	44,03	41,88	44,53	98,74	77,91	41,10	151,72	45,60	130,76	119,45	50,91
K/Cs	3752	361	3288	3908	17920	1065	>17600	367	14383	8720	1991
Rb/Cs	85,22	8,62	73,85	39,58	>230,00	25,93	116,00	8,04	110,00	73,00	39,11
Nb/Ta	21,38	1,82	7,61	>1,8	10,4	5,29	17,40	1,63	15,88	15,26	3,04
Ba/Sr	3,13	23,33	8,71	4,71	16,00	6,13	18,57	1,75	10,14	5,08	18,75

Nº Amostra	4469 GEN	4471a GEN	4471 GEN	4547a GEN	4596 GEN	4608 GEN	4571 GEN	5103 BREJ	5105b BREJ	5121 SIL	5131 SIL
K/Rb	32,71	44,57	45,09	28,09	24,08	35,34	23,32	18,83	305,36	25,55	19,69
K/Cs	5867	2000	3035	4267	2095	2750	948	441	>17100	2993	856
Rb/Cs	179,33	44,87	67,31	151,90	87,00	77,81	40,65	23,43	>56,00	117,14	43,47
Nb/Ta	5,38	8,06	4,8	2,54	2,84	3,77	1,58	1,13	>10,00	7,38	11,72
Ba/Sr	4,64	6,91	7,36	3,25	3,33	6,11	4,00	4,69	106,00	16,00	28,18

Nº Amostra	4321 MM1 PR	4336 M PR	4375 MM2 PR	5188 PR	4340 PR	5005 Mi ME	5009 ME	5064 ME	5065 ME	5043 SAL	5057 SAL
K/Rb	66,27	61,96	44,4	88,73	20,54	43,96	82,33	52,54	64,77	31,96	89,60
K/Cs	5225	2850	3417	3017	441	1890	354	2278	4500	1264	>17920
Rb/Cs	78,82	46	76,92	34	21,47	42,98	4,30	43,33	69,47	39,55	>200
Nb/Ta	3,85	3,95	3,10	2,50	0,37	2,56	1,72	2,56	3,48	3,72	12,97
Ba/Sr	4,08	12,14	19,00	0,88	4,18	3,75	3,00	6,00	20,00	2,22	11,71

Tabela 9.3 - Valores das razões, em muscovitas, utilizadas como indicadores do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos. TA=Talho Aberto, PES= Pé da Serra, RPIR= Rio Piracicaba, EUX= Euxenita, SA= Serra Azul, SAI= Santo Antônio do Itambé, GEN= Generosa, BREJ= Brejauba, SIL= Siliviano, PR= Ponte da Raiz, ME= Morro Escuro, SAL= Salto.

Nº Amostra	5108 TAB	5125 ARR	5190 MAR	5196 CAF	5159 Olim	5162 CP	5184 SAU	5016 FER	5112 IVAL	5.20 GEN*	5.28 GEN*
K/Rb	43,21	63,68	193,04	73,28	35,58	143,65	60,64	40,00	30,70	29,12	30,50
K/Cs	3683	4033	>17766	727	2657	>18100	7773	1557	838		
Rb/Cs	85,22	63,33	>92,00	9,92	74,67	>126,00	128,18	38,93	27,30		
Nb/Ta	21,38	11,07	>40,00	9,23	6,22	10,33	19,23	4,4	2,6		
Ba/Sr	3,13	16,67	14,44	15,00	2,71	5,17	8,80	3,86	1,5		

Tabela 9.3 continuação - TAB= Taboca, ARR= Arruda, MAR= Marilene, CAF= Cafezeiro, OLIM= Olímpio, CP= Cheira Pau, SAU= Saulo, FER= Ferros, IVAL= Ivalde, GEN*= Generosa, dados de Wegner (1983).

Nº Amostra	5045 SAL	5055 SAL	5117 IVAL	5142 SAI	5173 JOS	5181 A.ROD	5183 SAU	5005 ME	5104 BREJ	5109 TAB	5129 SIL
K/Rb	125,24	129,49	120,63	48,35	105,2	144,91	113,86	79,70	115,74	102,93	26,91
K/Cs	3430	2183	5514	132	256	6131	1285	999	607	1678	1368
Rb/Cs	27,39	16,86	45,71	2,72	2,42	42,31	11,29	12,53	4,69	16,30	50,81
Nb/Ta	15,33	17,50	16,92	1,10	10,77	7,92	23,75	3,57	11,11	19,00	27,86
Ba/Sr	30,91	>72,00	38,00	40,00	236,00	>56,00	>54,00	66,00	>58,00	36,00	81,11

Tabela 9.4. Valores das razões, em biotitas, utilizadas como indicadores do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos. SAL= Salto, IVAL= Ivalde, SAI= Santo Antônio do Itambé, Jos= Sr. Josias, A.ROD= Amélio Rodrigues, SAU= Sr. Saulo, ME= Morro Escuro, BREJ= Brejauba, TAB= Taboca, SIL= Sillvano.

Os dados relativos às razões K/Rb e Ba/Sr encontrados para as micas da faixa Rio Piracicaba - Serra Azul são compatíveis com os publicados por Lopes Nunes (1973), Wegner (1983) e Cerný (1991). Através da Figura 9.3 pode-se notar que a maior parte dos dados se localiza no campo dos pegmatitos radioativos de Moçambique, ficando muito próximos dos valores médios para as rochas graníticas. Marciano et al. (1992) estudando o comportamento das muscovitas através dos gráficos de Cerný & Burt (1984), destacou a semelhança existente entre a disposição dos dados de Lopes Nunes (1973) para os pegmatitos radioativos e potássicos, como estes obtidos em muscovitas da borda ocidental da PPO (Figura 9.4). A razão entre a relação K/Rb e o Li é ainda mais crítica, pois os dados obtidos neste trabalho não se enquadram em nenhuma das classes pegmatíticas apresentadas no gráfico de Cerný & Burt (1984). Sabe-se contudo que há poucos dados publicados a respeito dos pegmatitos anatéticos da classe abissal, para que se possa estabelecer uma maior precisão na classificação. Esta deficiência tem sido salientada por Cerný em seus trabalhos de síntese de 1982, 1984, 1986 e 1991. Digna de nota, é a dispersão dos dados de Lopes Nunes no referido gráfico, indicativa de mais uma semelhança, entre os pegmatitos brasileiros estudados nesta tese e os africanos. O gráfico da Figura 9.5 expressa uma boa correlação entre o tipo radioativo africano e o brasileiro. Os campos referentes aos pegmatitos estéreis, muscovíticos e a elementos raros situam-se na outra extremidade do gráfico (Cerný, 1991).

A relação Li/Rb da Figura 9.6. possibilita afirmar que dentre os corpos estudados as lavras de Brejauba e da Generosa são aquelas que apresentam maior grau de diferenciação. O estado de oxidação avaliado pela Figura 9.7, mais uma vez, destaca a Lavra de Generosa como aquela que apresenta comportamento diferenciado. Esta lavra tem todos os seus dados lançados na metade superior do gráfico, característica das muscovitas menos oxidadas, enquanto as demais se

Figura 9.3. Relação K/Rb nas muscovitas de pegmatitos da porção ocidental da PPO. O retângulo representa o campo dos dados das muscovitas analisadas por Lopes Nunes (1973)

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)		Silivano (SIL)
TA		SAL		SIL
○ 4847-MOS	PE da Serra (PES)	■ 5108-MOS	Taboca	GEN*
○ 5073-MOS	PES	■ 5125-MOS	Arruda	GEN*
○ 4932-MOS	Rio Piracicaba	■ 5190-MOS	Marilene	GEN*
	Euxenita (EUX)	■ 5196-MOS	Cafezeiro	
	EUX	■ 5159-MOS	Sr. Olimpio	
□ 4822-MOS	Serra Azul (SA)	■ 5162-MOS	Cheira Pau	GEN*-Dados de Wener (1983).
□ 5252-MOS	SA	■ 5184-MOS	Sr Saulo	
□ 4149-MOS	SA	■ 5016	Ferros	
□ 5140-MOS	S. Antonio Itambe	■ 5112-MOS	Ivalde	
	Ponte da Raiz (PR)	▲ 4469-MI	Generosa (GEN)	
	PR	▲ 4471A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4471-MOS	Gen	
	PR	▲ 4547A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4596-MOS	Gen	
▲ 5005-MI	Morro Escuro (ME)	▲ 4608-MOS	Gen	
▲ 5009-MOS	ME	▲ 4571-MOS	Gen	
▲ 5064-MOS	ME		Brejauha (BREJ)	
▲ 5065-MOS	ME		BREJ

Figura 9.4 - Disposição dos dados dos pegmatitos da área de tese, que incluem os assinalados com uma cruz ou um retângulo cheio. A dispersão dos dados é característica dos pegmatitos desta região.

Figura 9.5 - Disposição dos dados de muscovitas, publicados por vários autores, no gráfico que relaciona a razão K/Rb com o teor em Ti. Os dados relativos às muscovitas dos pegmatitos com ocorrência em Santa Maria de Itabira estão em destaque para salientar a dispersão entre aqueles dos tipos potássico e radioativo de Lopes Nunes (1973).

Figura 9.6. Relação Li/Rb em muscovitas. As amostras da Lavra da Generosa são aquelas que apresentam maior homogeneidade de dados. A muscovita da Lavra Silivano é a que apresenta maior grau de diferenciação.

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)	Silivano (SIL)
TA		SAL	SIL
○ 4847-MOS	PE da Serra (PES)	■ 5108-MOS	Taboca
○ 5073-MOS	PES	■ 5125-MOS	Arruda
○ 4932-MOS	Rio Piracicaba	■ 5190-MOS	Marilene
	Euxenita (EUX)	■ 5196-MOS	Cafezeiro
	EUX	■ 5159-MOS	Sr. Olimpio
□ 4822-MOS	Serra Azul (SA)	■ 5162-MOS	Cheira Pau
□ 5252-MOS	SA	■ 5184-MOS	Sr Saulo
□ 4149-MOS	SA	■ 5016	Ferros
□ 5140-MOS	S. Antonio Itambe	■ 5112-MOS	Ivalde
	Ponte da Raiz (PR)	▲ 4469-MI	Generosa (GEN)
	PR	▲ 4471A-MOS	Gen
	PR	▲ 4471-MOS	Gen
	PR	▲ 4547A-MOS	Gen
	PR	▲ 4596-MOS	Gen
▲ 5005-MI	Morro Escuro (ME)	▲ 4608-MOS	Gen
▲ 5009-MOS	ME	▲ 4571-MOS	Gen
▲ 5064-MOS	ME		Brejauba (BREJ)
▲ 5065-MOS	ME		BREJ

GEN*-Dados de Wener (1983).

Figura 9.7. Relação FeO/Fe2O3 em muscovitas. Nota-se a colocação das amostras de muscovita da Lavra da Generosa, em relação as demais.

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)		Silivano (SIL)	
○	TA	■	SAL	■	SIL
○	4847-MOS PE da Serra (PES)	■	5108-MOS Taboca	■	GEN*
○	5073-MOS PES	■	5125-MOS Arruda	■	GEN*
○	4932-MOS Rio Piracicaba	■	5190-MOS Marilene	■	GEN*
	Euxenita (EUX)	■	5196-MOS Cafezeiro		
□	4822-MOS Serra Azul (SA)	■	5159-MOS Sr. Olimpio		
□	5252-MOS SA	■	5162-MOS Cheira Pau		
□	4149-MOS SA	■	5184-MOS Sr Saulo		
□	5140-MOS S. Antonio Itambe	■	5016 Ferros		
	Ponte da Raiz (PR)	■	5112-MOS Ivalde		
	PR	▲	4469-MI Generosa (GEN)		
	PR	▲	4471A-MOS Gen		
	PR	▲	4471-MOS Gen		
	PR	▲	4547A-MOS Gen		
	PR	▲	4596-MOS Gen		
▲	5005-MI Morro Escuro (ME)	▲	4608-MOS Gen		
▲	5009-MOS ME	▲	4571-MOS Gen		
▲	5064-MOS ME		Brejauba (BREJ)		
▲	5065-MOS ME		BREJ		

GEN*-Dados de Wener (1983).

localizam na porção inferior, exceção feita às lavras do Talho Aberto e Silivano, esta última com razão $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ igual a 1.

Möller (1989) apresenta a razão Ta/Cs em micas, como indicadora do aumento relativo da concentração destes dois elementos, em sistemas graníticos pobres em cálcio. Na Figura 9.8 a seta indica a tendência relativa ao aumento do grau de diferenciação dos corpos pegmatíticos, evidenciando as lavras de Serra Azul, Ponte da Raiz e Brejauba como aquelas que apresentam maior diferenciação.

9.5.1. OS ELEMENTOS TERRAS RARAS

As amostras de muscovita e biotita dos pegmatitos da faixa Rio Piracicaba - Serra Azul foram analisadas quanto ao conteúdo em elementos terras raras, visando um melhor entendimento a respeito da sua gênese. A Tabela 9.5 exibe 16 análises de muscovita e 5 de biotita. O número maior de amostras analisadas em relação ao número de feldspatos, diz respeito a uma maior afinidade dos elementos terras raras com a estrutura das micas pois são substitutos do Ca, Fe e Mg (Möller 1989), e ainda ao número de pegmatitos cujos feldspatos estão totalmente caulinizados. As feições mais marcantes dos padrões de distribuição destes elementos, consistem nas presenças de anomalia negativa em Eu exibidas pelas Figuras 9.9. e 9.10, referentes às análises de muscovita e biotita, respectivamente. Outra feição característica é a relativa ao enriquecimento em ETRL em relação aos ETRP. A uniformidade do padrão de distribuição dos ETR é mais acentuado nas amostras de muscovita do que nas de biotita. Não há fracionamento dos ETRP. O comportamento delineado acima é compatível com um fracionamento fusão - cristal.

9.5.2. CARACTERIZAÇÃO MÖSSBAUER DE BIOTITA

Durante os trabalhos analíticos relacionados à tese, houve a possibilidade de serem submetidas à análises, por esta técnica, dez amostras de biotita. O objetivo primeiro deste procedimento analítico se caracterizou como a oportunidade de aprender uma nova técnica e utilizá-la como ferramenta na cristalochímica, seguido da interação entre a ótica dos físicos e a dos geocientistas. Uma das metodologias empregadas na avaliação do conteúdo de FeO é a volumetria que envolve abertura da amostra através de ácidos e posterior titulação. Este processo tende a engrandecer a quantidade de Fe_2O_3 devido ao ataque com ácido e também à exposição ao ar de amostra cominuída. A Espectroscopia Mössbauer minimiza estes problemas, e ainda permite o conhecimento do sítio ocupado pelos átomos de ferro, e em que estado de oxidação e coordenação se encontram.

Figura 9.8. Relação entre o conteúdo em Ta e Cs, em muscovitas dos pegmatitos da borda ocidental da PPO. Mesma legenda da Figura 9.2.

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)		Silivano (SIL)	
TA		SAL		SIL	
○ 4847-MOS	PE da Serra (PES)	■ 5108-MOS	Taboca		GEN*
○ 5073-MOS	PES	■ 5125-MOS	Arruda		GEN*
○ 4932-MOS	Rio Piracicaba	■ 5190-MOS	Marilene		GEN*
	Euxenita (EUX)	■ 5196-MOS	Cafezeiro		
	EUX	■ 5159-MOS	Sr. Olimpio		
□ 4822-MOS	Serra Azul (SA)	■ 5162-MOS	Cheira Pau		GEN*-Dados de Vener (1983).
□ 5252-MOS	SA	■ 5184-MOS	Sr Saulo		
□ 4149-MOS	SA	■ 5016	Ferros		
□ 5140-MOS	S. Antonio Itambe	■ 5112-MOS	Ivalde		
	Ponte da Raiz (PR)	▲ 4469-MI	Generosa (GEN)		
	PR	▲ 4471A-MOS	Gen		
	PR	▲ 4471-MOS	Gen		
	PR	▲ 4547A-MOS	Gen		
	PR	▲ 4596-MOS	Gen		
▲ 5005-MI	Morro Escuro (ME)	▲ 4608-MOS	Gen		
▲ 5009-MOS	ME	▲ 4571-MOS	Gen		
▲ 5064-MOS	ME		Brejauba (BREJ)		
▲ 5065-MOS	ME		BREJ		

MUSCOVITA											
Nº amostra	4340	4596	4847	5043	5065	5103	5105	5112	5108	4918	5121
Lavra	PR	GEN	PES	SAL	ME	BREJ	BREJ	IVAL	TAB	TA	SIL
La	0,990	0,351	0,716	2,134	0,644	4,670	14,763	0,770	0,902	0,675	3,419
Ce	3,310	2,034	2,600	3,380	7,600	8,104	6,305	2,940	2,967	2,827	7,507
Nd	0,815	0,409	0,722	0,494	0,760	2,006	1,005	0,710	0,870	0,910	3,118
Sm	0,103	0,090	0,138	0,130	0,268	0,315	0,169	0,155	0,179	0,322	0,607
Eu	0,022	0,014	0,031	0,022	0,084	0,052	0,045	0,027	0,026	0,029	0,065
Gd	0,046	0,088	0,154	0,112	0,422	0,349	0,160	0,181	0,170	0,433	0,391
Dy	0,063	0,109	0,160	0,080	0,740	0,242	0,122	0,131	0,084	0,935	0,228
Ho	0,015	0,028	0,039	0,015	0,180	0,048	0,022	0,025	0,019	0,211	0,052
Er	0,055	0,113	0,150	0,048	0,692	0,130	0,079	0,070	0,068	0,695	0,176
Yb	0,151	0,589	0,720	0,060	2,850	0,140	0,099	0,060	0,059	0,915	0,476
Lu	0,046	0,136	0,160	0,022	0,744	0,042	0,035	0,038	0,038	0,131	0,142
Σ_{ETR}	5,616	3,961	5,590	4,885	14,984	16,098	11,652	5,105	5,382	8,083	16,038
Sm /Nd	0,126	0,220	0,191	0,263	0,353	0,157	0,168	0,218	0,206	0,354	0,195
(La /Lu) _{CN}	2,23	0,268	0,464	2,464	0,090	11,543	10,713	2,103	2,464	0,535	2,395
Eu /Eu .	0,379	0,241	0,534	0,379	1,448	0,896	0,776	0,465	0,448	0,50	1,120
$\Sigma_{ETRL} / \Sigma_{ETRP}$	13,88	10,76	9,00	13,43	1,65	15,87	21,45	9,13	11,23	8,85	9,90

MUSCOVITA						BIOTITA					
Nº amostra Lavra	5131 SIL	5125 ARR	5149 SA	5152 SAI	3875 EUX	3870 EUX	4830 EUX	5045 SAL	5117 IVAL	5142 SAI	
La	7,419	1,425	1,426	0,847	2,536	59,150	7,329	1,908	8,334	7,170	
Ce	6,771	6,521	4,756	3,311	3,870	13,440	16,200	4,850	1,807	4,534	
Nd	6,205	1,695	1,237	0,720	1,890	56,750	6,079	4,815	6,492	9,741	
Sm	1,330	0,413	0,297	0,180	0,376	8,783	1,424	1,212	1,412	1,667	
Eu	0,147	0,074	0,036	0,029	0,049	1,368	0,108	0,221	0,148	0,139	
Gd	1,059	0,297	0,265	0,180	0,268	4,050	1,253	1,375	1,066	1,063	
Dy	1,049	-,209	0,252	0,161	0,306	2,944	1,700	1,315	0,775	0,786	
Ho	0,215	0,044	0,057	0,031	0,080	0,584	0,371	0,276	0,168	0,153	
Er	0,609	0,132	0,194	0,092	0,263	1,553	1,159	0,847	0,519	0,660	
Yb	0,878	0,169	0,157	0,102	0,263	1,351	1,445	0,782	0,539	1,848	
Lu	0,189	0,064	0,059	0,040	0,044	0,198	0,214	0,153	0,144	0,417	
ΣETR	25,871	11,043	8,736	5,693	9,945	136,911	37,282	17,754	21,374	28,178	
Sm /Nd	0,214	0,244	0,240	0,250	0,199	0,155	0,234	0,252	0,217	0,171	
(La /Lu)CN	4,075	2,311	2,509	2,199	5,990	31,00	3,55	1,29	7,59	1,79	
Eu /Eu .	2,534	1,275	0,620	0,500	0,845	23,580	1,861	3,810	2,550	2,400	
ΣETRL /ΣETRP	4,075	10,990	3,060	2,300	7,080	12,930	5,850	2,690	5,670	4,690	

Tabela 9.5. Dados analíticos sobre os elementos terras raras de micas das lavras da área de tese. PR= Ponte da Raiz, GEN= Generosa, PES= Pé da Serra, SAL= Salto, ME= Morro Escuro, BREJ= Brejaúba, IVAL= Ivalde, TAB= Taboca, TA= Talho Aberto, SIL= Silivano, ARR= Arruda, SA= Serra Azul, SAI= Santo Antônio do Itambé, EUX= Euxenita.

Figura 9.9 . Padrão dos elementos terras raras em muscovita das lavras da área de tese.

LEGENDA

Talho Aberto (TA)		Salto (SAL)		Silivano (SIL)
TA		SAL		SIL
○ 4847-MOS	PE da Serra (PES)	■ 5108-MOS	Taboca	GEN*
○ 5073-MOS	PES	■ 5125-MOS	Arruda	GEN*
○ 4932-MOS	Rio Piracicaba	■ 5190-MOS	Marilene	GEN*
	Euxenita (EUX)	■ 5196-MOS	Cafezeiro	
	EUX	■ 5159-MOS	Sr. Olimpico	
□ 4822-MOS	Serra Azul (SA)	■ 5162-MOS	Cheira Pau	
□ 5252-MOS	SA	■ 5184-MOS	Sr Saulo	
□ 4149-MOS	SA	■ 5016	Ferros	
□ 5140-MOS	S. Antonio Itambe	■ 5112-MOS	Ivalde	
	Ponte da Raiz (PR)	▲ 4469-MI	Generosa (GEN)	
	PR	▲ 4471A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4471-MOS	Gen	
	PR	▲ 4547A-MOS	Gen	
	PR	▲ 4596-MOS	Gen	
▲ 5005-MI	Morro Escuro (ME)	▲ 4608-MOS	Gen	
▲ 5009-MOS	ME	▲ 4571-MOS	Gen	
▲ 5064-MOS	ME		Brejauba (BREJ)	
▲ 5065-MOS	ME		BREJ	

GEN*-Dados de Wener (1983).

Figura 9.10. Padrão dos elementos terras raras em biotita das lavras de Euxenita, Salto, Ivalde e Santo Antônio do Itambé.

O trabalho desenvolvido foi apresentado em congresso internacional e tema de uma publicação (Macedo et al. 1994). O ferro se apresenta nas amostras estudadas como Fe^{2+} , Fe^{3+} , e ainda em um estado intermediário de oxidação denominado $\text{Fe}^{2.5+}$, sempre em coordenação octaédrica. Esta última valência é caracterizada pela constante mudança na ocupação dos sítios M_1 e M_2 por íons ferroso e férrico, devido a transferência de carga. O valor exato deste estado de oxidação pode ser representado por um número entre 2 e 3, e dependerá da relação ferro ferroso para ferro férrico (Bahgat & Hassan 1988). A figura 9.11 apresenta os espectros Mössbauer de biotita, e o gráfico c se refere a amostra 5104 da Lavra Brejauba, na qual o ferro aparece neste estado anômalo de oxidação (Bahgat & Hassan 1988). A comparação entre os dados obtidos por volumetria nos laboratórios da Geosol com os de espectrometria Mössbauer, obtidos nos laboratórios da CDTN, esta referida na Tabela 9.6. Ambas as metodologias empregaram as amostras pulverizadas.

Figura 9.11. Espectros Mössbauer de Biotita. Sil = Silivano, SAI = Santo antônio do Itambé, BREJ = Brejaúba, Me = Morro Escuro.

Laboratório	5142 SAI	3870 EUX	4830 EUX	5129 SIL	5104 BREJ	5109 TAB	5045 SAL	5055 SAL	5117 IVAL	5005 ME
Geosol										
Fe ²⁺	15,37	11,7	12,25	3,82	13,73	12,56	10,84	10,84	9,75	12,03
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	2,85	2,06	1,86	0,32	2,45	1,95	1,68	1,47	1,41	2,86
CDTN										
Fe ²⁺ MS	69,5	77,3	77,8	33,0	69,7	74,0	67,5	70,1	78,5	86,4
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	2,28	3,40	3,50	0,49	2,30	2,84	2,08	2,34	3,65	6,35

Tabela 9.6. Análise de ferro em biotita por metodologia convencional e por Espectroscopia Mössbauer. As siglas utilizadas para as lavras são as mesmas da Tabela 9.2A.

Para a maioria das amostras os dados obtidos foram os esperados. Os valores da relação $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ são menores para a Espectroscopia Mössbauer em relação à metodologia convencional. Duas amostras exibiram dados maiores para a análise por volumetria, o que possivelmente indica um erro analítico em uma das duas metodologias. A variação entre os dados obtidos pelas duas técnicas analíticas é muitas vezes maior na amostra 5005 da Lavra do Morro Escuro em Santa Maria de Itabira.

9.6. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas a partir do estudo das micas e sua relação com os pegmatitos estudados podem ser resumidas da seguinte forma:

- As duas espécies de micas encontradas são muscovita e biotita.
- A maior parte das amostras de muscovita é representada pelo politipo 2M₁ e a biotita pelo politipo 1M.
- A fase fluida do sistema tem composição aquosa, podendo ser encontrados gás carbônico e metano.
- Os dados químicos apresentam uma grande dispersão dos valores nos gráficos estudados. São micas pobres em elementos alcalinos raros, com razão K/Rb entre 170 - 50. As razões Li/Rb e Ta/Cs apontam as lavras Silivano, Generosa e Brejauba como as mais diferenciadas no primeiro gráfico, e Serra Azul, Brejauba e Ponte da Raiz, no segundo. O estado de oxidação dos minerais, fornecido pela razão ferro ferroso para ferro férrico identifica as lavras da Generosa, Talho Aberto e Silivano como aquelas que apresentam micas menos oxidadas. A dispersão dos dados químicos pode significar diferentes fontes produtoras do material submetido à anatexia.

- O padrão de distribuição dos ETR é caracterizado sempre por anomalia negativa para o Eu, maior conteúdo em ETRL em relação aos pesados
- O ferro ocorre na estrutura destas micas sempre em coordenação octaédrica.

10. OS BERILOS

O berilo é o mineral de maior importância econômica nestes corpos pegmatíticos, sendo esta espécie a responsável pelos trabalhos de lavra em toda a região do Vale do Alto Rio Doce. Dela são retirados o berilo azul, variedade água marinha e o berilo amarelo, variedade heliodoro ou ouro. Segundo Drumond (1985), a região de Santa Maria de Itabira é a responsável pelas gemas de maior intensidade de cor azul dentre as produzidas no Brasil. Na área selecionada para esta tese todos os corpos pegmatíticos têm sido lavrados para obtenção da água marinha. Neste capítulo serão apresentados dados para 16 amostras de berilos estudados, e em adição serão salientados aqueles referentes às lavras da região de Santa Maria de Itabira, pois os berilos desta região tiveram suas inclusões fluidas estudadas por microtermometria.

Em Itabira encontram-se em fase de lavra duas minas de esmeraldas; as minas de Belmont e da Capoeirana, que foram estudadas por Souza (1988), Souza et al. (1992) e Machado (1995). O presente trabalho não se ocupará do estudo das esmeraldas, apesar destes corpos estarem cadastrados, bem como os de Esmeralda de Ferros e de Brejauba.

10.1. ASPECTOS MORFOLÓGICOS

Duas gerações de berilo podem ser discriminadas nestes pegmatitos. Aquela que ocorre na zona gráfica grosseira ou zona intermédia, caracterizada por cristais bem desenvolvidos, que alcançam dimensões decimétricas. São opacos, com coloração azulada ou esverdeada, apresentando-se na forma prismática. A designação "escória" é usualmente empregada pelos garimpeiros para amostras que apresentam este aspecto e sua importância econômica está ligada a obtenção do Be. A região central destes cristais, contêm, por vezes, porções transparentes de água marinha de qualidade gemológica. Esta geração de berilo se associa a feldspato potássico pertitzado, quartzo e muscovita em livros de até 15cm. Os cristais que ocorrem nas unidades de substituição são via de regra terminados por pinacóides, raras vezes por bipirâmides, e neste caso apresentam-se bem menores que os anteriores. Esses têm como paragênese albita, frequentemente na variedade cleavelandita, quartzo, muscovita de segunda geração em cristais de cerca de 2 a 3cm, topázio, granada e outros. Apresentam-se com cores azul, variedade água marinha e amarelo, variedade heliodoro. A dureza destes minerais é 7,5 e o peso específico varia entre 2,67 a 2,75.

10.2. ASPECTOS MICROSCÓPICOS

A microscopia foi utilizada para a determinação dos índices de refração, bem como na descrição dos aspectos microscópicos apresentados pelas amostras de berilo. As inúmeras inclusões sólidas sequer puderam ser identificadas, pois demandaria um estudo muito detalhado que foge ao escopo deste trabalho.

A tabela 10.1 relaciona dados de duas amostras de berilo, ambos da Lavra Ponte da Raiz. Nesta ocorrência os cristais de cor amarela (heliodoro) ocorrem segundo cristais anédricos, arredondados, sendo mais raros que as demais variedades. Em geral possuem dimensões entre 1 e 2cm de diâmetro; entretanto, foi retirado de lá um cristal prismático de 8cm de comprimento por 2cm de largura. Os dados obtidos para esses minerais são bem semelhantes àqueles obtidos por Lahti & Kinnunen (1993), provenientes do pegmatito Luumäki na Finlândia.

Amostra	4321	4857
Cor	Azul	Amarelo
Variedade	Água Marinha	Heliodoro
Índice de Refração	ne = 1,574 nw = 1,580	ne = 1,574 nw = 1,579
Birrefringência	n = 0,006	n = 0,005
Caráter Óptico	Uniaxial Negativo	Uniaxial Negativo
Luminescência à Radiação U.V.	Inerte tanto sob comprimento de radiação longo como curto	Inerte tanto sob comprimento de radiação longo como curto
Peso Específico	2,699	2,678

Tabela 10.1 - Propriedades físicas dos berilos da Lavra Ponte da Raiz, Santa Maria de Itabira.

10.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A difratometria de raios X foi utilizada tanto na identificação das diferentes fases minerais como na obtenção de formas de classificação, através das propriedades detectadas, capazes de fornecer subsídios para interpretações de índole genética e econômica dos corpos pegmatíticos dessa região.

A análise dos difratogramas dos berilos destes corpos permite classificá-los como politipos T₁ onde as substituições de Be por Li são realizadas nas posições tetraédricas. Este politipo é o mais comum (Bakakin et al. 1970).

Uma das análises caracterizou a amostra 4321 como berilo do tipo N, que é aquele cuja composição química se aproxima mais da composição ideal, teórica. Por este mesmo método foram identificadas as reflexões que mostram a associação berilo-

bavenita, ocasionada por processo de alteração. Os dados obtidos a partir da difratometria de raios X são encontrados na Tabela 10.2.

FASE MINERAL	AMOSTRA	POLITIPO ESTRUTURAL	DADOS DA CÉLULA UNITÁRIA	LAVRA
BERILO	5064	T1	$a_0 = 9,199\text{\AA}$ $c_0 = 9,161\text{\AA}$ $v = 671,299\text{\AA}^3$	MORRO ESCURO
	4321	N	$a_0 = 9,215\text{\AA}$ $c_0 = 9,206\text{\AA}$ $v = 676,989\text{\AA}^3$	PONTE DA RAIZ
	4857Pr	T1	$a_0 = 9,190\text{\AA}$ $c_0 = 9,180\text{\AA}$ $v = 671,320\text{\AA}^3$	PONTE DA RAIZ
	Ber Pr	T1	$a_0 = 9,132\text{\AA}$ $c_0 = 9,147\text{\AA}$ $v = 660,668\text{\AA}^3$	PONTE DA RAIZ
BAVENITA	BAV-Ber Pr		$a_0 = 9,752\text{\AA}$ $b_0 = 11,489\text{\AA}$ $c_0 = 4,998\text{\AA}$ $v = 559,990\text{\AA}^3$	PONTE DA RAIZ
	BAV 4857		$a_0 = 9,809\text{\AA}$ $b_0 = 11,503\text{\AA}$ $c_0 = 4,948\text{\AA}$ $v = 554,892\text{\AA}^3$	PONTE DA RAIZ

Tabela 10.2 - Dados estruturais de berilos das lavras do Morro Escuro e Ponte da Raiz, obtidos por meio de difração de raios X.

10.4. QUIMISMO DOS BERILOS

O conhecimento do conteúdo em álcalis e água nos berilos está intimamente correlacionado com as características geoquímicas e paragenéticas dos sistemas geológicos onde são gerados. Cerný (1975) modificou a classificação anteriormente estabelecida por Beus (1960), baseada na quantidade de álcalis, propondo a subdivisão dos berilos de pegmatitos em cinco tipos. As análises químicas obtidas neste trabalho possibilitam o enquadramento destes minerais entre os do tipo I, berilos sem álcalis que apresentam a soma de álcalis total menor que 1% em peso, e berilos do tipo II, berilos sódicos, nos quais o sódio é o álcali predominante com teores variando entre 0,5 e 1%. Utilizando o diagrama proposto por Trueman & Cerný (1982), verifica-se que os pontos relativos às análises dos berilos da região estudada, localizam-se no campo A, muito próximos à linha da ordenada, que se refere a berilos

oriundos de pegmatitos estéreis e portadores de Be, Nb, Ta, pobres em álcalis raros (Figura 10.1). Da comparação destes dados com outros referidos por Correia Neves et al. (1984) para os berilos procedentes de toda a PPO, e os apresentados por Marciano (1985) para aqueles oriundos das lavras do Ferreirinha e Olho de Gato, nota-se que os berilos da porção ocidental da PPO são aqueles mais pobres em álcalis de toda a Província Pegmatítica Oriental (PPO), só semelhantes aos da Lavra do Ferreirinha, em Governador Valadares.

Figura 10.1 - Classificação dos pegmatitos baseada nas análises químicas dos berilos, segundo Trueman & Cerný (1982). Observa-se que os corpos estudados situam-se no grupo A da classificação citada.

As relações entre a percentagem de SiO_2 e os teores em ppm de Li, Cs e o total de álcalis visualizados na Figura 10.2, mais uma vez confirmam que estes berilos são muito pobres nestes elementos. As áreas salientadas nos gráficos são relativas aos corpos pegmatitos de dimensões maiores que ocorrem na borda ocidental da PPO. A comparação entre eles indica que os berilos da Lavra da Generosa são os mais ricos em Li e no total de álcalis em relação aos pegmatitos do Morro Escuro e da Ponte da Raiz, da região de Santa Maria de Itabira. Estes últimos apresentam maior teor em Cs, que nesta última ocorrência o teor é mais baixo. Os berilos de Serra Azul, dentre todos os estudados, são os mais ricos em Li, Cs e total de álcalis.

Figura 10.2 - Gráficos relacionando Σ álcalis X BeO (A), Li X SiO₂ (B) e Cs X SiO₂ (C) de berilos da lavra Ponte da Raiz comparados com outros de Santa Maria de Itabira e de outras regiões na borda ocidental da PPO.

10.5. INCLUSÕES FLUIDAS DOS BERILOS

Com o objetivo de se conhecer o papel da temperatura na formação do berilo, lançou-se mão do estudo de suas inclusões fluidas (IF). Essa metodologia já vem sendo empregada por vários autores nesse mesmo mineral desde o final da década de 40 (Roedder (1951); Cameron et al. (1951); Cameron et al. (1953); Sinkankas (1981); Souza & Svisero (1987); Souza et al. (1987); Souza (1989); Mendes (1989); Souza et al. (1990); Lathi & Kinnunen, (1993)). Para tanto foram preparadas duas lâminas delgadas e três seções bipoladas do berilo 4858, proveniente da Lavra Ponte da Raiz.

Utilizou-se para o estudo petrográfico e microtermométrico um microscópio Leitz Laborlux 12Pol5 - acoplado a uma câmara clara. A platina de aquecimento-resfriamento (-180°C/+600°C) é um modelo 818P15 da Chaimeca-Eurotherm do Centro de Pesquisa Professor Manoel Teixeira da Costa da UFMG.

O mapeamento realizado sob microscópio indicou a existência de três tipos diferentes de inclusões fluidas: primárias, pseudo-secundárias e secundárias (Achtschin et al. 1994). (Fotomicrografias 10.1, 10.2 e 10.3).

As inclusões primárias apresentam-se nas formas de tubo ou de cristal negativo, orientados paralelamente ao eixo cristalográfico *c*. As primeiras possuem dimensões geralmente inferiores a 10 μ m, enquanto as outras podem alcançar até 20 μ m. Ocorrem ainda nesta categoria inclusões sub arredondadas, que são menos frequentes. Neste grupo predominam as inclusões fluidas bifásicas (L+G), embora possam ser encontradas monofásicas (L?) e trifásicas (L+L+G) ou (L+G+S). As fases sólidas (S) podem apresentar formas retangulares e pseudo hexagonais. O volume da fase gasosa (G) é variável, podendo chegar a ocupar 50% do volume total da inclusão. A microtermometria confirmou a composição aquo-carbônica destas inclusões fluidas concordando com os dados obtidos pela espectroscopia no infravermelho. Durante o resfriamento, daquelas IF desprovidas de fases sólidas, a fusão do CO₂ (Tf CO₂) ocorreu, invariavelmente, entre -56,4 e -56,8 °C. Já no aquecimento foi possível inferir a temperatura de fusão de clatratos (Tf Cl) entre 6,2 e 6,4°C. Estes valores permitem calcular a salinidade aproximada da fase squosa, que é equivalente a aproximadamente 8% em peso de NaCl (Collins, 1979). A homogeneização da fase gasosa de CO₂ (Th CO₂) ocorreu sempre próximo dos 31°C. As IF sub-arredondadas começam a homogeneizar totalmente (Th tot) a 310°C e continuam até 460°C. Acima desta temperatura algumas IF tubulares ainda não haviam se homogeneizado. Não foi observada crepitação nas IF primárias.

Neste trabalho não foram estudadas as fases sólidas e as IF trifásicas (L+G+S). As fases não são birrefringentes e talvez sejam cristais de saturação. Se esse fato for confirmado, esses cristais de saturação devem ser halita e silvita.

As inclusões fluidas pseudo-secundárias apresentam formas semelhantes as das IF primárias, embora ocorram sempre orientadas. Estes alinhamentos aparentemente não ultrapassam as dimensões dos cristais hospedeiros, motivo pelo qual foram classificadas como pseudo secundárias. O mapeamento não confirmou se algumas destas direções correspondem a linhas de crescimento do berilo. A natureza do fluido destas inclusões é aquo-carbônica, e são semelhantes em composição às IF primárias. Podem ser monofásicas, bifásicas e até multifásicas. Dentro deste grupo foi possível distinguir 3 tipos de IF que se diferenciam somente pelas características das fases sólidas. Um primeiro tipo apresenta inclusões com uma única fase sólida anédrica. No segundo, as IF apresentam vários cristais da mesma fase sólida. O terceiro tipo apresenta fases sólidas não birrefringentes (cristais de saturação) de

Fotomicrografias 10.1, 10.2 e 10.3 -

formas poligonais que podem chegar a ocupar 80% do volume total da inclusão. Estes tipos de IF não ocorrem misturados no mesmo alinhamento. Estão vinculados à direções diferentes, mas em nenhuma delas foi possível confirmar um caráter secundário.

Durante o resfriamento das IF bifásicas, trifásicas e multifásicas foi observada $T_f \text{ CO}_2$ a $-56,8^\circ\text{C}$.

Durante o aquecimento foi estimada em várias destas IF a $T_f \text{ CL}$ a $7,0^\circ\text{C}$. Este valor indica que a salinidade da fase aquosa é equivalente a aproximadamente 5% em peso de NaCl. A $T_h \text{ CO}_2$ ocorreu na fase líquida a temperaturas entre $16,7$ e $31,0^\circ\text{C}$. Já $T_h \text{ tot}$ começou por volta dos 300°C e continuou até 410°C . Nas IF multifásicas a homogeneização total da fase gasosa não ultrapassou os 315°C .

As inclusões secundárias atravessam os cristais de berilo segundo alinhamentos irregulares e se continuam em outros minerais do pegmatito como nos feldspatos. Esses alinhamentos estão diretamente relacionados a microfraturamentos posteriores à formação do cristal, ao longo dos quais, antes do fechamento e suturação, percolaram fluidos tardios.

Estas inclusões apresentam formas extremamente variadas (sub-arredondadas, estreladas, amebóides, etc.). Podem ser monofásicas (L), bifásicas e trifásicas (S+L+G). Foram estudadas as IF aquosas, que aparentemente não apresentam CO_2 . Durante os testes de resfriamento algumas delas mostraram um comportamento metaestável. Na IF bifásicas que não apresentaram metaestabilidade foi possível registrar a T_e em torno de -20°C , o que indica que o fluido corresponde ao sistema salino H_2O -NaCl (Crawford, 1981). A fusão do gelo ocorre entre $-3,5$ e $-2,0^\circ\text{C}$ o que indica que os fluidos possuem salinidade baixa, equivalente a 3,4-5,7% em peso de NaCl (Bodnar & Vitykl, 1994). Não foi determinada a T_h destas IF, mas este valor dificilmente deve ultrapassar os 200°C .

As inclusões fluidas monofásicas possivelmente secundárias, em forma de tubo, relacionadas a outros alinhamentos secundários, também foram estudadas microtermometricamente. Durante o resfriamento foi possível estimar a temperatura do ponto eutético (T_e) perto dos -35°C apontando para a provável existência de Fe^{++} ou Na^+ e Mg^{++} no sistema (Roedder, 1984). A temperatura de fusão do gelo ($T_f \text{ gelo}$) ocorreu entre $-3,5$ e $-0,9^\circ\text{C}$, o que indica para esta IF salinidades equivalentes a 1,4-5,7% em peso de NaCl. A continuidade destes estudos confirmará, ou não, a presença de CO_2 ou alguma outra fase molecular nestas inclusões (Tabela 10.4).

Classificação	Inclusões Fluidas Primárias	Inclusões Fluidas Pseudo Secundárias	Inclusões Fluidas Secundárias
Forma	Tubulares Cristais Negativos Subarredondadas	Semelhante às inclusões primárias	Subarredondadas Estreladas, Amebóides
Dimensão	Tubulares <10mm Sub arredondadas atingem 20mm		
Fases	Monofásicas (L) Trifásicas (L+L+G) ou (L+V+ G) Polifásicas (L+L+G+S)	Monofásicas (L) Bifásicas (H ₂ O e CO ₂) Polifásicas (L+L+G+S)	Monofásicas (S ou L) Bifásicas Trifásicas (S+L+V)
Distribuição	Paralelas ao eixo e aleatórias	Alinhadas segundo direções, não bem definidas	Ao longo de fraturas irregulares
Composição	H ₂ O, CO ₂ e Sólidos	H ₂ O, CO ₂ e Sólidos	H ₂ O (CO ₂ ?)
Medidas Termométricas	Tf CO ₂ -56,4 a -56,8°C Tf CL 6,2 a 6,4°C	Tf CO ₂ -56,8°C Tf CL 7°C	Te -35°C Monofásicas Tf gelo -3,5 a 0,9°C
Salinidade	8 % Peso NaCl	5 % Peso NaCl	4-6 % Peso NaCl
Temperatura de Homogeneização	TH CO ₂ 31°C (gasosa) TH Tot 310 a 460°C (subarredondadas)	TH CO ₂ 16,7 a 31°C (líquida) TH Tot 300 a 410°C	TH < 200°C

Tabela 10.4 - Classificação e caracterização das inclusões fluidas de berilos da Lavra Ponte da Raiz.

10.6. CONCLUSÕES

- Os berilos de pegmatitos de Santa Maria de Itabira são pobres em álcalis e apresentam formas politépicas T ou N (Babakin et al. 1970). Segundo a classificação de Cerný (1975) são sódicos. Em sua maioria são empregados como fonte de berílio ou como gemas nas variedades água-marinha e heliodoro. Os pegmatitos portadores destes berilos são do tipo A, pegmatitos estéreis portadores de Be, Nb, Ta e pobres em álcalis raros (Trueman & Cerný 1982). Os fluidos primários estudados nos berilos apresentam composição no sistema H₂O-CO₂-NaCl, já os fluidos secundários são de composição aquosa (provavelmente sem CO₂), podendo ocorrer ainda CH₄. A cristalização desse mineral ocorreu em um intervalo de temperatura entre 310 e 460°C que corresponde à temperatura de formação do final da zona mural e zona intermédia, sendo muito semelhante à do pegmatito Luumäki que ocorreu entre 400 e 490°C.

11. OS NIÓBIOS TANTALATOS

Os pegmatitos da porção ocidental da Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais (PPO) são portadores de minerais ricos em Nb, apresentando igual ou menor conteúdo em Ta.

A abordagem desse grupo mineral, em um capítulo específico desta tese, deve-se a ênfase dada ao estudo cristalquímico dos nióbio-tantalatos a partir da década de 70. A percepção do papel desempenhado por estes minerais no processo de cristalização das rochas, capaz de servir como indicadores das condições físico-químicas desses sistemas, bem como da evolução ocorrida durante a cristalização, elevou-os a uma condição de grande importância entre os minerais acessórios dos corpos pegmatíticos.

Dar-se-á, inicialmente, uma introdução a respeito da classificação sistemática adotada correntemente, para estes óxidos, com o intuito de demonstrar que o conhecimento cristalquímico destes minerais é condição "sine qua non" para o entendimento dos processos atuantes na cristalização dos corpos pegmatíticos abordados neste trabalho.

Várias publicações têm divulgado as ocorrências brasileiras de nióbio tantalatos, principalmente sobre aqueles procedentes da Província Pegmatítica Nordestina (Adusumilli 1968, 1976, 1978, e Adusumilli et al. 1974). As amostras de nióbio-tantalatos da PPO têm sido estudadas por Dun et al. (1978), Cassedanne & Cassedanne (1979), Marciano (1985), Cassedanne (1986), Marciano et al. (1992), Mendes & Castañeda (1982) e Bilal et al. (1993). O enfoque do ponto de vista cristalquímico foi iniciado com os trabalhos de Adusumilli (1976) na Província Nordestina, e por Marciano (1988) e Bilal et al. (1993) na PPO.

11.1. CLASSIFICAÇÃO DOS NIÓBIO-TANTALATOS

A sistematização dos minerais de Nb e Ta na forma de óxidos classes foi iniciada com os trabalhos de Hawthorne (1983, 1985, 1986), e está fundamentada em unidades básicas que são poliedros formados pelos cátions Nb^{5+} , Ta^{5+} , ou por seus mais habituais substitutos Ti^{4+} , Sn^{4+} e W^{6+} , designados por cátions M, e pelo oxigênio, principal ânion, nomeado ânion O. Os grupamentos aniônicos mais frequentes são os de configuração octaédrica $(\text{Nb,Ta})\text{O}_6$ e $(\text{Nb,Ta})\text{O}_7$ em forma de bipirâmide pentagonal.

Sete classes foram propostas por Hawthorne para os óxidos de nióbio e tântalo, tendo por base o tipo de arranjo dos poliedros constituídos pelos cátions M ligados aos oxigênios. A ordenação destes grupamentos baseia-se no decréscimo da basicidade de Lewis, e é iniciada pelo poliedro mais básico M_2O_5 e termina com a classe menos básica constituída pelos grupamentos M_3O_{13} . As subclasses são organizadas segundo o grau de polimerização sofrido pelos grupamentos aniônicos. O terceiro nível desta sistemática fundamenta-se no tipo estrutural formado por grupamentos finitos, cadeias infinitas, planos ou folhas infinitas, estruturas tridimensionais quanto ao arranjo dos poliedros. São conhecidos 21 diferentes tipos estruturais (Cerný & Ercit 1989). As espécies de nióbio-tantalatos encontradas nos pegmatitos da borda ocidental da PPO são principalmente columbita, samarskita e euxenita.

A Tabela 11.1 exibe a classificação dos nióbio-tantalatos estudados neste trabalho.

Classe (grupo aniônico)	Subclasse (polimerização)	Tipo Estrutural	Descrição	Espécie Fórmula
[MO ₄]	Cadeia	Samarskita	Cadeias em zig-zag de octaedros compartilhados pelas arestas (estrutura torcida da Wolframita)	Samarskita (Y,Fe,U,ETR)(Nb,Ta,Ti)O ₄
[MO ₃]	Folha	Columbita	Folhas enrugadas formadas de cadeias em zig-zag de octaedros compartilhados pelas arestas e ligados pelos vértices.	Manganocolumbita - MnNb ₂ O ₆ Ferrocolumnbita - FeNb ₂ O ₆ Manganotantalita - MnTa ₂ O ₆ Ferrotantalita - (Fe,Mn)(Ta,Nb) ₂ Magnocolumbita - MgNb ₂ O ₆ Fersmita CaNb ₂ O ₆ Pseudo-ixiolita - (Ta,Nb,Mn,Fe) ₃ O ₆
[MO ₃]	Folha	Euxenita	Estrutura torcida da Columbita	Euxenita (Y,ETR)(Nb,Ti,Ta) ₂ O ₆ Tanteuxenita (Y,ETR)(Ta,Nb,Ti) ₂ O ₆ Policrásio (Y,ETR)(Ti,Nb,Ta) ₂ O ₆

Tabela 11.1 - Classificação sistemática dos nióbio-tantalatos segundo Cerný & Ercit (1989). São apresentadas apenas as classes, subclasses e grupos estruturais necessários ao estudos dos minerais de ocorrência na borda ocidental da PPO.

O tipo estrutural samarskita é caracterizado por ser encontrado na natureza na forma metamíctica. O conhecimento atual sobre a cristalquímica deste agrupamento é devida aos trabalhos de Sugitani et al. (1985), que gozaram do privilégio de encontrar este mineral na forma cristalina, sem quaisquer alterações. Posteriormente, Sugitani et al. sintetizaram uma estrutura semelhante a da samarskita,

com composição aproximada $YFe_2Nb_5O_{16}$. O tratamento das formas metamícticas por aquecimento possibilita a reorganização estrutural, porém segundo Cerný & Ercit (1989) este processo produz três das quatro fases, nenhuma delas representativas da estrutura original. A simetria da samarskita é ortorrômbica (Vlasov 1966); porém, pode-se apresentar topologicamente como monoclínica. A maioria dos pegmatitos onde a samarskita é encontrada são constituídos por suites anorogênicas, podendo estar também associados à granitos orogênicos ricos em Y e ETR. Estes últimos são principalmente os ETR intermediários, Dy, Gd e por vezes o Sm. Estes minerais apresentam composição química bastante complexa, sendo reconhecidos pelo alto teor em ferro. Os outros elementos bastante comuns são o U, o Ti e o Ca. Sua fórmula geral é AMO_4 , ocorrendo sob o tipo de estrutura da ixiolita desordenada, ou em uma estrutura ortorrômbica com forma monoclínica de baixa temperatura do tipo wolframita.

Os minerais da série columbita-tantalita são os nióbio tantalatos de mais ampla ocorrência em pegmatitos. São ortorrômbicos, com fórmula geral AM_2O_6 , onde $A = Fe, Mn, Mg$ e $M = Nb, Ta$, estando presentes ainda menores quantidades de Fe^{3+} , Sc, Ti, Sn e W. As espécies mais ricas em nióbio são as mais abundantes. Os membros extremos desta série são aqueles referidos na Tabela 11.1. A columbita é encontrada na natureza com estrutura desordenada ou parcialmente ordenada. As razões $Ta/(Ta+Nb)$ e $Mn/(Mn+Fe)$ crescem da borda em direção ao centro dos corpos pegmatíticos. Geralmente ocorre como fase primária nos pegmatitos podendo ser substituída por minerais tardios, tais como microlita e fersmita. Formas ricas em Ta e Fe são mais raras e cristalizam-se com a estrutura tetragonal da tapiolita. Heinrich (1962) faz referência a uma columbita radioativa, encontrada em estado metamíctico, associada a minerais de urânio e de tório.

A série euxenita-policrásio apresenta estrutura semelhante à da columbita do tipo ordenado, com a mesma fórmula geral; porém, os cátions $A = Y, ETR$, são maiores e fazem com o oxigênio coordenação oito. Apresenta-se geralmente metamictizada, sendo necessário o aquecimento para a reorganização da estrutura, que neste caso, exibe uma grande complexidade como no caso da samarskita. A euxenita foi descrita por Guimarães (1926) com o nome de eschwegeita, porém esta denominação caiu em desuso. É um mineral típico de pegmatitos ricos em Y e ETR, com afiliação anorogênica ou orogênica.

11.2. ASPECTOS MACROSCÓPICOS

As amostras de nióbio-tantalatos procedentes dos pegmatitos estudados, apresentam-se geralmente anédricas, com exceção àquelas samarskitas coletadas na

Lavra do Silivano, que expressam externamente uma simetria monoclínica. Na Lavra da Generosa as massas de columbita chegam a alcançar 6 a 10cm (Fotografia 11.1), e muitas vezes ocorrem em intercrescimento com a samarskita, que na região recebe o nome de anerodita. As amostras de columbita apresentam brilho metálico e cor negra, enquanto os cristais de euxenita e os de samarskita geralmente acham-se cobertos por uma camada amarelada a amarronzada de brilho não metálico comum. Segundo Vlasov (1966) esta camada de alteração é constituída por óxidos de titânio nas formas polimórficas de rutilo ou anatásio. O peso específico apresenta-se em ampla faixa, ocorrendo variações em fragmentos da mesma amostra, devido a variações composicionais. O peso específico das amostras de columbita variou de 5,31 a 6,30, o da euxenita de 4,49 a 5,05; e o da samarskita de 4,88 a 5,28. Como a maior parte das amostras de nióbio-tantalatos estudadas foi obtida através de doações realizadas por parte dos donos das minas ou garimpeiros, é impossível estabelecer uma relação genética delas através do seu posicionamento no corpo pegmatítico. Esta possibilidade ocorre quando se apresentam associadas a minerais característicos de uma determinada zona, como é o caso da ocorrência de samarskita e cleavelandita.

FIGURA 11.1. Cristal de columbita coletado na Lavra da Generosa, Sabinópolis, Minas Gerais.

11.3. ESTUDO POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

A comparação dos diagramas de difração obtidos através das análises executadas com o pó das amostras de nióbio-tantalatos, selecionadas para serem estudadas nesta tese, permitiu classificá-las em metamícticas, cristalinas e desordenadas ou ordenadas.

Alguns diagramas apresentaram somente a radiação de fundo característico de substâncias amorfas ou metamícticas; outros exibiram somente duas ou três das reflexões mais intensas além da radiação de fundo, o que permitiu identificá-los como pertencentes a amostras parcialmente metamictizadas.

A presença das reflexões dos planos (020), (110), (220) e (240) cujos d 's medidos em Å são, respectivamente, 7,14; 5,27; 2,66 e 2,238; caracterizam o polimorfo ordenado de columbo-tantalita (Moreau & Tramasure 1965). O polimorfismo ordem-desordem nas columbo-tantalitas consiste na ocorrência dos átomos Nb e Ta em sítios M, alternados com as posições ocupadas pelos átomos de Fe e Mn nos sítios A. O preenchimento de forma fortuita desses sítios por estes quatro elementos caracteriza o polítipo desordenado. As amostras estudadas são do tipo desordenado, logo são formas de mais baixa temperatura (Moreau & Tramasure 1965).

As dimensões e volume da célula elementar foram calculados utilizando o programa Miller 2 para microcomputadores, baseado nos valores dos d 's obtidos pelas análises difratométricas. Os dados relativos aos parâmetros a e c das amostras das columbitas estudadas, lançados no diagrama de Cerný & Turnock (1971), modificado por Wise et al. (1985), situam-se no campo relativo ao tipo desordenado (Figura 11.1). O não enquadramento de todos os dados dentro do poliedro pode sugerir que, columbitas com composição química mais complexa possuam dimensões dos parâmetros proporcionais à variação entre os raios iônicos dos elementos comuns ocupantes dos sítios estruturais e aqueles que os substituem. Com este raciocínio pode-se esperar que os dados sobre a composição química confirmem esta localização dos dados analíticos neste gráfico.

11.4. ASPECTOS MICROSCÓPICOS

A utilização da microscopia no estudo dos minerais deste grupo teve como objetivo principal o conhecimento através das seções bipolidas da textura, variação composicional, presença de inclusões e principais associações mineralógicas visando aplicá-lo no estudo por microscopia eletrônica de varredura, acoplado ao sistema EDS. O zonamento químico pode ser observado de pronto, devido à variação de cor.

FIGURA 11.1. Diagrama de Cerný & Turnock (1971) exibindo a disposição das amostras de columbita, dos pegmatitos da borda ocidental da PPO, no campo das amostras desordenadas..

Micrografia 11.1 -

que ocorrem em zonas de fratura e que foram identificadas como uranomicrolita; as menores subédricas, com aproximadamente 5μ , ocorrem bordejando as primeiras (Micrografia 11.2).

Procedentes da Lavra do Morro Escuro em Santa Maria de Itabira, foram analisadas duas amostras. Uma foi identificada como samarskita (5154) enquanto a outra é uma columbita (5096) onde $Ta > Nb$ e $Mn > Fe$. Nesta última seção o zoneamento é fantástico, ocorrendo segundo duas direções perpendiculares entre si, podendo ainda serem classificados em primários (faixas mais largas e mais abundantes) e secundários. A samarskita apresenta zonas de oxidação do ferro, ao longo de fraturas, caracterizadas pela coloração mais escura das áreas de ocorrência. Aparecem nesta seção vênulas de urânio e inclusões de torianita. A composição química é caracterizada por $Nb > Ta$, $Fe > Mn$, U, Y, Ti, Ca e Pb.

Os nióbio-tantalatos de composição química e mineralógica mais complexas são os que ocorrem na Lavra Ponte da Raiz. Deste pegmatito foram analisadas três amostras, a 4862B constituída por cristal anédrico de samarskita em contato com

monazita, a 4862A identificada como tantalita e finalmente a de n 4338, uma samarskita. A primeira amostra citada mostra uma composição química onde o $Nb > Ta$, $Fe > Mn$, U e Y com traços de Ti. As inclusões mais comuns da monazita são constituídas por cristais de torita ou huttonita, torianita e de minerais de urânio. O mineral tengerita, carbonato de ítrio contendo terras raras pesadas como Yb, Dy, Er e Gd e ainda traços de Sm, foi encontrado como inclusão na samarskita. As inclusões mais comuns nas duas seções de samarskitas são, columbita, uranomicrolita e uraninita. A amostra 4862A é bastante semelhante àquela descrita no parágrafo anterior, procedente da Lavra do Morro Escuro.

Micrografia 11.2 -

A única amostra examinada do Pegmatito Pé da Serra (5156) foi identificada como euxenita. Nesta seção pode-se observar a presença três fases constituintes de vido à variação na coloração. A cor intermediária pertence à fase dominante constituída por Ti, $Nb > Ta$ e Fe. Não foi detectada a presença de Mn ou de U nesta porção da amostra. A fase mais escura é caracterizada por um enriquecimento em Ti em relação à fase dominante. A fase mais clara exibe um aumento nos conteúdos de Ta e Fe.

monazita, a 4862A identificada como tantalita e finalmente a de nº4338, uma samarskita. A primeira amostra citada mostra uma composição química onde o Nb>Ta, Fe>Mn, U e Y com traços de Ti. As inclusões mais comuns da monazita são constituídas por cristais de torita ou huttonita, torianita e de minerais de urânio. O mineral tengerita, carbonato de ítrio contendo terras raras pesadas como Yb, Dy, Er e Gd e ainda traços de Sm, foi encontrado como inclusão na samarskita. As inclusões mais comuns nas duas seções de samarskitas são, columbita, uranomicrolita e uraninita. A amostra 4862A é bastante semelhante àquela descrita no parágrafo anterior, procedente da Lavra do Morro Escuro.

Micrografia 11.2 -

A única amostra examinada do Pegmatito Pé da Serra (5156) foi identificada como euxenita. Nesta seção pode-se observar a presença três fases constituintes de vido à variação na coloração. A cor intermediária pertence à fase dominante constituída por Ti, Nb>Ta e Fe. Não foi detectada a presença de Mn ou de U nesta porção da amostra. A fase mais escura é caracterizada por um enriquecimento em Ti em relação à fase dominante. A fase mais clara exhibe um aumento nos conteúdos de Ta e Fe.

11.6. QUIMISMO DOS NIÓBIO-TANTALATOS

A composição química dos nióbio tantalatos foi determinada através da microsonda eletrônica, no laboratório da Escola de Minas de Paris. A Tabela 11.2 exhibe as análises realizadas em 11 amostras. Há uma completa concordância entre os dados obtidos por MEV-EDS e estes obtidos por microsonda. Utilizando a classificação de Vlasov (1966) as variedades de columbita-tantalita encontradas nestes pegmatitos vão de ferro-columbita a mangano-columbita, esta última ocorre raramente, pois dificilmente é encontrada a proporção $\text{MnO}:\text{FeO} > 3:1$. Em poucas amostras o Ta é igual ou pouco maior do que o Nb. Considerando a metodologia empregada, e sabendo que este aumento em Ta pode corresponder a um zoneamento químico, pode-se afirmar que nesta área não ocorre tantalita.

A Figura 11.2 representa a tendência de enriquecimento em Mn e Ta demonstrado por estas amostras, que pode ser analisado de duas formas. A primeira leva em consideração de que nos sistemas pegmatíticos há uma tendência de enriquecimento em Mn e Ta na direção da zona marginal para o núcleo do corpo (Vlasov 1966, Correia Neves 1981, Marciano 1985). O segundo raciocínio não invalida o primeiro pois diz respeito a ação desempenhada pelo flúor na complexação do Mn nos estágios finais, o que explicaria o teor mais elevado em Mn destas columbitas, quando comparadas com aquelas analisadas por Marciano 1985, procedentes das lavras do Ferreirinha e Olho de Gato. A presença de fluorita e topásio nas paragêneses destes corpos seriam demonstrativas do teor elevado em flúor deste sistema.

A ocupação do sítio M pelo Ti, Sn ou W em substituição ao Nb e Ta está representada na Figura 11.3. Os dados se dispõem segundo três tendências representadas pelas retas de regressão. A reta 1 indica um enriquecimento em Ti destas columbitas, principalmente daquelas das lavras do Morro Escuro, Ponte da Raiz e Ivalde, uma vez que as análises apresentam valores praticamente constantes para o Sn e W.

A substituição no sítio ocupado pelo Fe e Mn pelo Ti, Sn e W apresenta uma dispersão dos dados, e demonstra a pouca afinidade destes elementos pelo sítio A. A Figura 11.4 exhibe este aspecto cristaloquímico, que associado aquele salientado na Figura 11.3 indica vacâncias na estrutura cristalina, o que segundo Bilal et al. (1993) caracterizaria uma estrutura de polítipo desordenado. No raciocínio empregado por aqueles autores o gráfico da Figura 11.5 reforçaria esta propriedade, pois os dados referentes às análises da columbitas situam-se no campo das pseudoixiolitas.

LAVRA	Generosa							
N amostra % peso ↓	4747	4767	4767	4767	4767	4767B	4767B	4767B
WO ₃	1,17	0,79	0,59	0,73	0,61	0,07	0,03	n.d.
Ta ₂ O ₅	18,38	20,06	13,78	15,16	14,58	26,15	31,72	33,86
Nb ₂ O ₅	60,30	59,49	64,13	63,72	63,93	56,11	50,40	47,73
TiO ₂	1,56	1,11	1,48	1,44	1,40	0,10	0,12	0,17
MnO	5,23	7,10	4,39	4,47	4,57	9,33	9,60	9,35
FeO	14,17	11,75	15,20	14,96	14,72	9,63	8,61	8,49
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	n.d.	0,03	0,05	0,02	0,05	0,01	0,02	0,04
Na ₂ O	n.d.	0,04	0,03	n.d.	0,09	0,02	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
La ₂ O ₃	n.d.	0,06	0,07	n.d.	0,02	0,02	n.d.	n.d.
Ce ₂ O ₃	n.d.	0,02	0,09	0,03	0,14	0,13	0,20	0,09
Nd ₂ O ₃	n.d.	0,05	0,06	0,10	0,13	0,13	0,06	0,03
Dy ₂ O ₃	n.d.	0,05	0,01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Er ₂ O ₃	n.d.	0,11	0,23	0,17	0,06	0,03	n.d.	n.d.
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	n.d.	0,03	0,03	0,03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SnO ₂	0,19	0,22	0,18	0,10	0,18	n.d.	0,04	0,02
UO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ThO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MoO ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bi ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SrO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	101,00	100,91	100,32	100,93	100,48	101,73	100,83	99,81
Fórmula estrutural								
W	0,018	0,012	0,009	0,011	0,009	0,001		
Ta	0,299	0,329	0,222	0,243	0,235	0,437	0,549	0,598
Nb	1,63	1,62	1,71	1,70	1,71	1,56	1,45	1,40
Ti	0,070	0,050	0,066	0,064	0,062	0,005	0,006	0,008
Mn	0,265	0,363	0,220	0,224	0,229	0,486	0,517	0,514
Fe	0,709	0,593	0,752	0,739	0,728	0,495	0,458	0,461
Mg								
Ca		0,002	0,003	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003
Na		0,005	0,003		0,010	0,002	0,004	0,004
Al								
La		0,001	0,002					
Ce			0,002	0,001	0,003	0,003	0,005	0,002
Nd		0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,001	0,001
Dy		0,001						
Er		0,002	0,004	0,003	0,001	0,001		
Yb								
Y		0,001	0,001	0,001				
Sn	0,005	0,005	0,004	0,002	0,004		0,001	0,001
U								
Th								
Zr								
Mo								
Bi								
Sr								
Total	3,00	2,98	3,00	2,99	3,00	2,99	2,99	2,99

Tabela 11.2 - Análises químicas de minerais da série columbita-tantalita obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detectado). As amostras são procedentes das Lavra da Generosa.

LAVRA	Generosa				Silivano		Ivalde
Nº amostra→ % peso ↓	4769	4769	4770	4771	5155	5155	5119
WO ₃	0,87	0,78	0,78	0,63	0,90	1,05	0,26
Ta ₂ O ₅	17,44	18,60	18,62	17,91	8,87	7,83	36,22
Nb ₂ O ₅	58,67	58,48	58,14	61,09	69,06	69,85	42,76
TiO ₂	1,60	1,57	1,58	1,54	0,99	1,19	2,92
MnO	4,28	4,35	4,33	4,40	8,23	8,21	6,64
FeO	15,38	15,18	14,82	15,00	12,32	12,44	11,01
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,07	0,05	n.d.
CaO	0,04	0,02	0,04	n.d.	0,02	n.d.	n.d.
Na ₂ O	0,01	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Al ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,02
La ₂ O ₃	0,02	n.d.	0,05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ce ₂ O ₃	0,04	0,01	0,08	0,11	0,17	n.d.	0,03
Nd ₂ O ₃	0,13	0,13	0,10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dy ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Er ₂ O ₃	0,17	n.d.	0,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	0,18	0,10	0,13	0,17	n.d.	n.d.	n.d.
SnO ₂	0,18	0,21	0,20	0,17	0,09	0,05	n.d.
UO ₂	n.d.	0,09	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ThO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MoO ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bi ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SrO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	99,01	99,54	99,09	100,85	100,72	100,67	99,86
Fórmula estrutural							
W	0,014	0,012	0,012	0,010	0,013	0,016	0,004
Ta	0,290	0,308	0,310	0,291	0,139	0,122	0,640
Nb	1,62	1,61	1,61	1,65	1,80	1,82	1,25
Ti	0,073	0,072	0,073	0,069	0,043	0,051	0,143
Mn	0,221	0,225	0,225	0,223	0,403	0,400	0,365
Fe	0,785	0,774	0,759	0,749	0,595	0,598	0,598
Mg					0,006	0,004	
Ca	0,003	0,001	0,003		0,001		
Na	0,001	0,002					
Al							0,002
La			0,001				
Ce	0,001		0,002	0,002	0,004		0,001
Nd	0,003	0,003	0,002				
Dy							
Er	0,003		0,004				
Yb							
Y	0,006	0,003	0,004				
Sn	0,004	0,005	0,005	0,004	0,002	0,001	
U		0,330					
Th							
Zr							
Mo							
Bi							
Sr							0,001
Total	3,02	3,34	3,01	3,00	3,01	3,01	3,09

Tabela 11.2 - Análises químicas de minerais da série columbita-tantalita obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detetado). As amostras são procedentes das lavras da Generosa e Silivano.

LAVRA	Generosa				Silivano		Ivalde
Nº amostra→ % peso ↓	4769	4769	4770	4771	5155	5155	5119
WO ₃	0,87	0,78	0,78	0,63	0,90	1,05	0,26
Ta ₂ O ₅	17,44	18,60	18,62	17,91	8,87	7,83	36,22
Nb ₂ O ₅	58,67	58,48	58,14	61,09	69,06	69,85	42,76
TiO ₂	1,60	1,57	1,58	1,54	0,99	1,19	2,92
MnO	4,28	4,35	4,33	4,40	8,23	8,21	6,64
FeO	15,38	15,18	14,82	15,00	12,32	12,44	11,01
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,07	0,05	n.d.
CaO	0,04	0,02	0,04	n.d.	0,02	n.d.	n.d.
Na ₂ O	0,01	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Al ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,02
La ₂ O ₃	0,02	n.d.	0,05	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ce ₂ O ₃	0,04	0,01	0,08	0,11	0,17	n.d.	0,03
Nd ₂ O ₃	0,13	0,13	0,10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Dy ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Er ₂ O ₃	0,17	n.d.	0,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	0,18	0,10	0,13	0,17	n.d.	n.d.	n.d.
SnO ₂	0,18	0,21	0,20	0,17	0,09	0,05	n.d.
UO ₂	n.d.	0,09	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ThO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MoO ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bi ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SrO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	99,01	99,54	99,09	100,85	100,72	100,67	99,86
Fórmula estrutural							
W	0,014	0,012	0,012	0,010	0,013	0,016	0,004
Ta	0,290	0,308	0,310	0,291	0,139	0,122	0,640
Nb	1,62	1,61	1,61	1,65	1,80	1,82	1,25
Ti	0,073	0,072	0,073	0,069	0,043	0,051	0,143
Mn	0,221	0,225	0,225	0,223	0,403	0,400	0,365
Fe	0,785	0,774	0,759	0,749	0,595	0,598	0,598
Mg					0,006	0,004	
Ca	0,003	0,001	0,003		0,001		
Na	0,001	0,002					
Al							0,002
La			0,001				
Ce	0,001		0,002	0,002	0,004		0,001
Nd	0,003	0,003	0,002				
Dy							
Er	0,003		0,004				
Yb							
Y	0,006	0,003	0,004				
Sn	0,004	0,005	0,005	0,004	0,002	0,001	
U		0,330					
Th							
Zr							
Mo							
Bi							
Sr							0,001
Total	3,02	3,34	3,01	3,00	3,01	3,01	3,09

Tabela 11.2 - Análises químicas de minerais da série columbita-tantalita obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detetado). As amostras são procedentes das lavras da Generosa e Silivano.

LAVRA	Ponte da Raiz					Morro Escuro		
Nº amostra → % peso ↓	4338	4338	4338	4338	4862 A	5096	5154	5154
WO ₃	0,36	0,33	0,16	0,59	0,98	1,24	0,63	0,79
Ta ₂ O ₅	7,74	4,95	7,15	10,05	39,21	45,26	18,07	18,42
Nb ₂ O ₅	73,81	74,70	71,90	68,80	36,85	34,41	55,34	54,96
TiO ₂	0,25	0,22	0,31	0,60	3,75	2,73	1,52	1,57
MnO	2,72	5,45	1,43	1,46	9,46	10,45	4,41	4,46
FeO	17,62	14,68	18,82	18,38	7,19	6,25	15,22	15,22
MgO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
CaO	0,03	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01	0,02	0,04
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,04	0,01
Al ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,01	n.d.	n.d.
La ₂ O ₃	n.d.	n.d.	0,06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,06
Ce ₂ O ₃	0,27	n.d.	0,02	0,10	0,01	0,05	0,11	0,18
Nd ₂ O ₃	0,09	0,05	n.d.	0,07	n.d.	n.d.	0,04	0,11
Dy ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Er ₂ O ₃	0,06	n.d.	0,05	0,06	n.d.	n.d.	0,11	0,11
Yb ₂ O ₃	n.d.	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	0,05	0,07	0,02	0,05	n.d.	n.d.	0,04	0,06
SnO ₂	0,05	0,05	n.d.	n.d.	n.d.	0,32	0,02	0,20
UO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ThO ₂	n.d.	n.d.	0,01	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MoO ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bi ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SrO	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	103,6	100,73	99,95	100,20	97,46	100,77	95,57	96,16
Fórmula estrutural								
W	0,005	0,005	0,002	0,009	0,017	0,022	0,010	0,013
Ta	0,118	0,077	0,112	0,160	0,721	0,828	0,313	0,318
Nb	1,88	1,92	1,88	1,82	1,13	1,05	1,59	1,58
Ti	0,011	0,009	0,013	0,026	0,191	0,138	0,073	0,075
Mn	0,130	0,267	0,070	0,072	0,542	0,598	0,238	0,240
Fe	0,828	0,698	0,910	0,897	0,406	0,352	0,810	0,807
Mg					0,006	0,004		
Ca	0,002	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,003
Na	0,001						0,005	0,001
Al						0,001		
La		0,001						0,001
Ce	0,006			0,002		0,001	0,003	0,004
Nd	0,002	0,001		0,001			0,001	0,002
Dy		0,002						
Er	0,001		0,001	0,001			0,002	0,002
Yb								
Y	0,001	0,002	0,001	0,002			0,001	0,002
Sn	0,001	0,001				0,009	0,001	0,005
U								
Th								
Zr								
Mo								
Bi								
Sr								
Total	2,99	2,98	2,99	2,99	3,01	3,00	3,05	3,05

Tabela 11.2 - Análises químicas de minerais da série columbita-tantalita obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detectado). As amostras são procedentes das lavras da Ponte da Raiz e Morro Escuro em Santa Maria de Itabira.

Figura 11.4. Permuta dos elementos Ti+Sn+W pelos elementos Fe e Mn ocupantes do sítio A. A concentração dos dados em torno de 0,1 de Ti+Sn+W mostra a pouca afinidade destes elementos por este sítio. Legenda conforme a da Figura 11.2.

Figura 11.5. Diagrama [Ta+Nb]~[Ti+W+Sn]~[Fe+Mn]. Os pontos referentes às análises situam-se no campo das pseudoisoxolita. Legenda conforme a da Figura 11.2.

A Tabela 11.3 apresenta 15 análises de uma única amostra de euxenita procedente da Lavra do Silivano, enquanto a Tabela 11.2 exhibe os resultados analíticos da amostra 5156 que é caracterizada como policrásio devido ao seu elevado teor em Ti. Os dados relativos a esta última seção são concordantes com os resultados esperados para aquelas zonas enriquecidas em Ti desta mesma amostra analisada por MEV-EDS. A presença destes minerais na paragênese destes corpos é representativa de pegmatitos ricos em ETR e Y de suites orogênicas ou anorogênicas.

LAVRA	SILIVANO						
Nº amostra→ % peso ↓	5094	5094	5094	5094	5094	5094	5094
WO ₃	1,39	1,30	1,21	1,03	1,25	1,39	1,38
Ta ₂ O ₅	5,48	7,61	5,47	6,45	7,54	5,59	8,07
Nb ₂ O ₅	24,50	23,70	22,59	23,76	24,91	24,53	21,86
TiO ₂	23,54	2,33	23,42	22,34	21,43	22,24	21,85
MnO	0,01	0,04	n.d.	n.d.	0,04	0,05	0,02
FeO	0,94	1,12	0,97	1,51	0,90	0,79	1,07
MgO							
CaO	3,05	3,10	3,13	2,91	2,35	2,55	2,40
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
La ₂ O ₃	0,29	0,61	0,15	0,47	0,55	0,42	0,68
Ce ₂ O ₃	3,47	4,81	3,79	3,78	4,13	3,18	5,13
Nd ₂ O ₃	4,39	4,92	4,21	4,22	3,63	2,80	4,51
Dy ₂ O ₃	1,27	1,07	0,96	0,74	1,03	0,80	1,28
Er ₂ O ₃	0,54	0,66	0,79	0,80	0,71	0,55	0,88
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	11,39	10,72	10,41	10,89	11,40	8,70	11,09
SnO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
UO ₂	7,41	5,95	7,81	6,93	7,02	6,41	7,72
ThO ₂	12,53	12,51	13,80	13,00	12,21	10,41	12,17
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	100,20	100,45	98,71	98,83	99,10	90,41	100,11
Fórmula estrutural							
W	0,023	0,022	0,021	0,018	0,022	0,025	0,024
Ta	0,097	0,136	0,100	0,117	0,137	0,107	0,149
Nb	0,722	0,702	0,685	0,716	0,752	0,780	0,669
Ti	1,15	1,10	1,18	1,12	1,08	1,18	1,11
Mn	0,001	0,002			0,002	0,003	0,001
Fe	0,051	0,061	0,054	0,084	0,050	0,046	0,061
Ca	0,213	0,218	0,225	0,208	0,168	0,192	0,174
Na							
La	0,007	0,015	0,004	0,012	0,014	0,011	0,017
Ce	0,083	0,115	0,093	0,092	0,101	0,082	0,127
Nd	0,102	0,115	0,101	0,101	0,087	0,070	0,109
Dy	0,027	0,023	0,021	0,016	0,022	0,018	0,028
Er	0,011	0,014	0,017	0,017	0,015	0,012	0,019
Yb							
Y	0,395	0,374	0,372	0,387	0,405	0,326	0,399
Sn							
U	0,122	0,098	0,132	0,117	0,118	0,114	0,132
Th	0,186	0,187	0,211	0,197	0,186	0,167	0,187
Zr							
Total	3,19	3,18	3,22	3,20	3,16	3,13	3,21

Tabela 11.3 - Análises químicas de minerais da série euxenita-policrásio obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detetado). As amostras são procedentes da Lavra do Silivano.

A Tabela 11.3 apresenta 15 análises de uma única amostra de euxenita procedente da Lavra do Silivano, enquanto a Tabela 11.2 exhibe os resultados analíticos da amostra 5156 que é caracterizada como policrácio devido ao seu elevado teor em Ti. Os dados relativos a esta última seção são concordantes com os resultados esperados para aquelas zonas enriquecidas em Ti desta mesma amostra analisada por MEV-EDS. A presença destes minerais na paragêneses destes corpos é representativa de pegmatitos ricos em ETR e Y de suites orogênicas ou anorogênicas.

LAVRA	SILIVANO						
Nº amostra → % peso ↓	5094	5094	5094	5094	5094	5094	5094
WO ₃	1,39	1,30	1,21	1,03	1,25	1,39	1,38
Ta ₂ O ₅	5,48	7,61	5,47	6,45	7,54	5,59	8,07
Nb ₂ O ₅	24,50	23,70	22,59	23,76	24,91	24,53	21,86
TiO ₂	23,54	2,33	23,42	22,34	21,43	22,24	21,85
MnO	0,01	0,04	n.d.	n.d.	0,04	0,05	0,02
FeO	0,94	1,12	0,97	1,51	0,90	0,79	1,07
MgO							
CaO	3,05	3,10	3,13	2,91	2,35	2,55	2,40
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
La ₂ O ₃	0,29	0,61	0,15	0,47	0,55	0,42	0,68
Ce ₂ O ₃	3,47	4,81	3,79	3,78	4,13	3,18	5,13
Nd ₂ O ₃	4,39	4,92	4,21	4,22	3,63	2,80	4,51
Dy ₂ O ₃	1,27	1,07	0,96	0,74	1,03	0,80	1,28
Er ₂ O ₃	0,54	0,66	0,79	0,80	0,71	0,55	0,88
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	11,39	10,72	10,41	10,89	11,40	8,70	11,09
SnO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
UO ₂	7,41	5,95	7,81	6,93	7,02	6,41	7,72
ThO ₂	12,53	12,51	13,80	13,00	12,21	10,41	12,17
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	100,20	100,45	98,71	98,83	99,10	90,41	100,11
Fórmula estrutural							
W	0,023	0,022	0,021	0,018	0,022	0,025	0,024
Ta	0,097	0,136	0,100	0,117	0,137	0,107	0,149
Nb	0,722	0,702	0,685	0,716	0,752	0,780	0,669
Ti	1,15	1,10	1,18	1,12	1,08	1,18	1,11
Mn	0,001	0,002			0,002	0,003	0,001
Fe	0,051	0,061	0,054	0,084	0,050	0,046	0,061
Ca	0,213	0,218	0,225	0,208	0,168	0,192	0,174
Na							
La	0,007	0,015	0,004	0,012	0,014	0,011	0,017
Ce	0,083	0,115	0,093	0,092	0,101	0,082	0,127
Nd	0,102	0,115	0,101	0,101	0,087	0,070	0,109
Dy	0,027	0,023	0,021	0,016	0,022	0,018	0,028
Er	0,011	0,014	0,017	0,017	0,015	0,012	0,019
Yb							
Y	0,395	0,374	0,372	0,387	0,405	0,326	0,399
Sn							
U	0,122	0,098	0,132	0,117	0,118	0,114	0,132
Th	0,186	0,187	0,211	0,197	0,186	0,167	0,187
Zr							
Total	3,19	3,18	3,22	3,20	3,16	3,13	3,21

Tabela 11.3 - Análises químicas de minerais da série euxenita-policrácio obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detetado). As amostras são procedentes da Lavra do Silivano.

LAVRA	SILIVANO							
N amostra→ % peso ↓	5094	5094	5094	5094	5094	5094	5094	5094
WO ₃	1,22	1,17	1,11	1,43	1,23	1,22	1,33	1,36
Ta ₂ O ₅	7,18	6,04	6,99	7,09	7,00	6,70	6,34	7,64
Nb ₂ O ₅	25,65	24,13	26,17	25,69	25,05	24,82	24,24	23,39
TiO ₂	21,80	22,46	21,24	22,03	21,64	22,63	22,50	22,23
MnO	0,02	0,04	0,01	0,01	0,07	0,03	0,02	0,02
FeO	1,11	1,23	1,25	0,75	1,38	0,90	1,30	1,21
CaO	3,21	3,30	3,37	3,06	2,98	2,94	3,19	3,24
Na ₂ O	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
La ₂ O ₃	0,56	0,46	0,60	0,57	0,54	0,43	0,54	0,59
Ce ₂ O ₃	4,71	3,99	4,55	4,90	4,43	4,10	4,06	4,60
Nd ₂ O ₃	4,63	4,49	4,52	4,47	4,64	4,56	4,62	4,80
Dy ₂ O ₃	0,79	1,10	1,16	1,35	0,95	1,20	1,16	1,26
Er ₂ O ₃	0,57	0,66	0,78	0,72	0,45	0,86	0,80	0,62
Yb ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Y ₂ O ₃	10,07	10,37	10,30	10,28	9,97	10,80	11,19	10,77
SnO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
UO ₂	5,84	6,54	6,03	6,51	6,36	6,32	6,82	5,89
ThO ₂	11,90	11,40	11,77	12,31	11,89	11,77	11,90	12,53
ZrO ₂	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Total	99,35	97,38	99,85	101,17	98,58	99,28	100,01	100,52
Fórmula estrutural								
W	0,021	0,020	0,019	0,024	0,021	0,021	0,023	0,023
Ta	0,128	0,110	0,125	0,125	0,127	0,120	0,113	0,136
Nb	0,760	0,729	0,775	0,756	0,753	0,736	0,719	0,694
Ti	1,07	1,13	1,05	1,08	1,08	1,12	1,11	1,10
Mn	0,001	0,002	0,001	0,001	0,004	0,002	0,001	0,001
Fe	0,061	0,069	0,068	0,041	0,077	0,049	0,071	0,066
Ca	0,225	0,236	0,237	0,213	0,212	0,207	0,224	0,228
Na								
La	0,014	0,011	0,015	0,014	0,013	0,010	0,013	0,014
Ce	0,113	0,098	0,109	0,104	0,110	0,107	0,108	0,113
Nd	0,108	0,107	0,106	0,104	0,110	0,107	0,108	0,113
Dy	0,017	0,024	0,024	0,028	0,020	0,025	0,025	0,027
Er	0,012	0,014	0,016	0,015	0,009	0,018	0,016	0,013
Yb								
Y	0,351	0,369	0,359	0,356	0,353	0,377	0,391	0,376
Sn								
U	0,097	0,110	0,100	0,107	0,107	0,105	0,113	0,098
Th	0,179	0,173	0,176	0,182	0,180	0,176	0,178	0,193
Zr								
Total	3,16	3,20	3,18	3,16	3,17	3,17	3,20	3,19

Tabela 11.3 - Análises químicas de minerais da série euxenita-policrásio obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por cela elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detectado). As amostras são procedentes da Lavra do Silivano.

A Tabela 11.4. exibe os dados analíticos para as amostras de samarskitas das lavras da Ponte da Raiz e do Morro Escuro. Segundo Cerný & Ercit (1989), as samarskitas apresentam maior teor em ETRL em relação aos ETRP, e apresentam também um enriquecimento em Dy, Gd e algumas vezes Sm. As amostras dos pegmatitos da borda ocidental da PPO exibem maior teor em ETRL, porém não foi constatada a presença de Gd ou Sm através das análises de microsonda eletrônica.

LAVRA	PONTE DA RAIZ	MORRO ESCURO	N amostra → % peso ↑									
			4862B	5154	5154	5154	5154	5154	5154	5154	5154	5154
WO ₃			2,92	0,87	1,81	1,88	2,37	1,76	2,60	1,99		
Ta ₂ O ₅			9,64	5,37	3,38	3,72	3,65	3,47	3,73	3,61		
Nb ₂ O ₅			41,76	48,35	41,86	43,26	54,51	45,41	44,61	44,35		
TiO ₂			3,60	3,97	2,59	3,37	3,32	4,20	3,96	3,62		
MnO			0,91	0,44	0,64	0,83	0,70	0,70	0,84	0,89		
FeO			8,75	8,54	12,50	11,68	7,82	10,00	8,49	10,73		
CaO			1,26	1,06	2,80	1,61	3,05	1,66	2,41	2,35		
Na ₂ O			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
La ₂ O ₃			0,04	n.d.	0,02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
Ce ₂ O ₃			0,24	0,14	0,05	0,02	0,25	0,09	0,14	0,10		
Nd ₂ O ₃			0,45	0,20	0,33	0,44	0,48	0,37	0,49	0,43		
Dy ₂ O ₃			0,96	0,03	1,16	0,85	1,68	1,10	1,58	1,01		
Er ₂ O ₃			0,80	0,24	0,79	0,83	1,00	0,87	1,03	0,81		
Yb ₂ O ₃			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
Y ₂ O ₃			15,81	19,86	17,10	17,72	19,26	17,08	18,14	17,17		
Sm ₂ O ₃			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
UO ₂			10,94	7,81	12,43	12,25	10,46	10,49	10,45	10,22		
ThO ₂			3,22	3,11	2,39	2,38	2,72	2,94	2,40	2,92		
ZrO ₂			n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
Total			100,92	99,99	99,85	100,84	111,27	100,14	100,87	100,20		
Formula estrutural			0,053	0,015	0,033	0,034	0,037	0,031	0,046	0,035		
Ta			0,183	0,096	0,065	0,70	0,060	0,064	0,069	0,067		
Nb			1,31	1,44	1,34	1,36	1,48	1,40	1,37	1,37		
Ti			0,189	0,196	0,138	0,176	0,150	0,215	0,202	0,186		
Mn			0,054	0,025	0,038	0,049	0,036	0,040	0,048	0,051		
Fe			0,512	0,470	0,740	0,678	0,394	0,568	0,481	0,612		
Ca			0,094	0,075	0,212	0,120	0,197	0,121	0,175	0,172		
Na												
La			0,001		0,001	0,001	0,006	0,002	0,003	0,002		
Ce			0,006	0,003	0,001	0,001	0,006	0,002	0,003	0,002		
Nd			0,011	0,005	0,008	0,011	0,010	0,009	0,012	0,010		
Dy			0,022	0,001	0,026	0,019	0,033	0,024	0,035	0,022		
Er			0,018	0,005	0,018	0,018	0,019	0,019	0,022	0,017		
Yb												
Y			0,589	0,696	0,644	0,655	0,617	0,618	0,655	0,623		
Sn												
U			0,193	0,130	0,222	0,215	0,159	0,180	0,179	0,176		
Th			0,051	0,047	0,038	0,038	0,037	0,045	0,037	0,045		
Zr												
Total			3,29	3,20	3,52	3,44	3,23	3,34	3,33	3,39		

Tabela 11.4 - Análises químicas de samarskita obtidas por microsonda eletrônica. O número de cátions por célula elementar foi calculado na base de 3 oxigênios (n.d. = não detectado). As amostras são procedentes das lavras da Ponte da Raiz e Morro Escuro em Santa Maria de Itabira.

11.7. CONCLUSÕES

- Considerando os dados apresentados acima pode-se concluir que os nióbio-tantalatos que ocorrem nos pegmatitos estudados neste trabalho pertencem às classes $[MO_4]$ e $[MO_3]$ segundo a sistemática de Cerný & Ercit (1989).
- A columbita se cristaliza como politipo desordenado e apresenta $Nb \geq Ta$ e $Fe \geq Mn$. As principais inclusões encontradas são constituídas por espécies minerais de U, Y e ETR. Estas feições são características de sistemas pegmatíticos pouco evoluídos, enriquecidos em Y e ETR (Cerný 1991)
- A presença de euxenita ratifica a citação do item anterior, acrescentando ainda que é uma espécie mineral típica de pegmatitos anorogênicos ou orogênicos ricos em Y e ETR.
- A samarskita é um mineral característico de pegmatitos anorogênicos.

12. MONAZITA

Dentre os minerais do grupo dos fosfatos, somente será dada ênfase à monazita, a qual, além de apresentar uma distribuição ampla na área, ocorre na forma de grandes cristais que em algumas lavras alcançam medidas decimétricas. O estudo deste mineral é de suma importância pois, através de dados obtidos da sua composição química e de seus produtos de alteração, pode-se conhecer os processos atuantes na evolução da cristalização dos corpos pegmatíticos. Uma segunda razão que o torna digno de apreço é o fato de ser um dos mais importantes minérios de elementos de terras raras (Cesbron 1986), podendo ainda ser considerado como minério de tório, pois segundo Frondel (1958), este elemento pode substituir os elementos terras raras desde alguns ppm até 27%. Durante a primeira metade do século, a monazita sob a forma de mineral detrítico em areias fluviais e marinhas, proveniente do Brasil, e depois da Austrália e Índia, bem como aquela oriunda da exploração de pegmatitos, eram as únicas fontes dos elementos terras raras do grupo do Ce ou elementos terras raras leves (Möller 1986).

Os elementos terras raras começaram a ser descobertos e estudados no final do século dezoito, quando Arrhenius e Gadolin identificaram em um mineral desconhecido o elemento ítrio, que na verdade não correspondia a apenas um elemento, mas a uma mistura de vários daqueles que compõem o grupo dos elementos terras raras leves.

As referências sobre monazita começaram a ser publicadas a partir de 1823 (Dana 1892), e as análises para a determinação individual dos elementos terras raras, utilizando diferentes técnicas como fluorescência de raios X, espectrografia de emissão óptica e espectrofotometria vêm sendo efetuada, desde 1924. Murata et. al. (1953 e 1958) estudaram muitas amostras brasileiras de monazita, de vários distritos da Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais, publicando dados químicos de exemplares analisados provenientes de Ferros, Sabinópolis e Conceição do Mato Dentro.

12.1. A SÉRIE MONAZITA-HUTTONITA-CHERALITA

O primeiro membro desta série é na verdade uma solução sólida. O volume que descreve os minerais do grupo dos fosfatos no Dana's System of Mineralogy grafa

a composição química da monazita como $(\text{Ce, La, Y, Th})\text{PO}_4$, enquanto Derr et. al. (1966) faz referência a $(\text{Ce, La, Th})\text{PO}_4$. Os trabalhos de síntese desenvolvidos por Anthony (1957, 1965) utilizaram metodologias diversificadas na obtenção dos principais membros extremos da série CePO_4 - LaPO_4 . Montel (1957, 1965) e Montel et. al. (1989) sintetizaram como parte de um estudo experimental sobre a solubilidade da monazita em fusões graníticas, vários membros extremos na forma de gel hidróxido de terras raras a partir de reações entre hidróxido de amônia com TRCl_3 em solução aquosa. Um dos principais objetivos deste processo de síntese é a produção de padrões analíticos. A monazita cristaliza-se no sistema monoclinico, na classe de simetria $2/m$, no grupo espacial $P2_1/n$. Sua estrutura consiste em tetraedros PO_4 , distorcidos com cada átomo de elemento metálico desigualmente equidistante dos nove átomos de oxigênio. Há uma sistemática diminuição dos parâmetros da malha com o aumento da substituição dos íons Ce e La por íons menores como os de Ca e Th (Deer et. al. 1966).

A huttonita é um nesossilicato cuja fórmula química é ThSiO_4 (Pabst & Hutton 1951), isoestrutural da monazita, que pode ser obtido por dupla substituição $\text{Th}^{4+} + \text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Ce}^{3+} + \text{P}^{5+}$. Foi descrita como contendo 0,8% de Fe, 2,5% de TR e traços de P (Kucha 1980).

O outro membro isoestrutural desta série é a cheralita $(\text{Th, Ca, Ce, La, U, Pb})(\text{PO}_4.\text{SiO}_4)$ composto que segundo Bowie & Horne (1953) e Bowles et al. (1980) pertence ao sistema ternário TRPO_4 - $\text{CaTh}(\text{PO}_4)$ - ThSiO_4 .

Outros minerais polimorfos desta série, que se cristalizam no sistema tetragonal e que ocorrem associados às monazitas são xenotima $(\text{Y, TR})\text{PO}_4$ e torita (ThSiO_4) .

A monazita está sujeita a dois tipos de processos de alteração após sua cristalização: metamictização e alteração hidrotermal. O primeiro, devido ao decaimento sofrido pelo tório ou mesmo urânio, provoca destruição, parcial ou total da estrutura cristalina, ocasionada pelo bombardeio de partículas α . A alteração hidrotermal, por sua vez, promove a formação de uma borda de coloração mais clara dando origem a minerais como fluocerita, parisita, ítrio parisita, allanita e apatita. Segundo Cesbron (1986) este processo de alteração pode ser contemporâneo ao metamorfismo retrógrado.

12.2. CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Os exemplares coletados nos pegmatitos desta região apresentam-se com hábito prismático, raramente maciço, com forma subédrica. Os cristais têm dimensão

desde 1 a 2cm (Lavra da Marilene), até 10 a 18cm no Pegmatito da Generosa. Foram observadas fratura irregular a conchoidal, clivagem segundo (100) distinta e partição basal (001). O peso específico variou de amostra para amostra, mesmo em uma única ocorrência. Os valores obtidos estão no intervalo 4,702 a 5,345, este último encontrado em exemplares da Lavra do Morro Escuro. Nriagu (1984) em seu trabalho de síntese sobre minerais da classe dos fosfatos, apresenta o intervalo 4,6 a 5,4, salientando que há aumento no peso específico relacionado ao teor crescente de tório. A dureza situa-se entre 5,0 a 5,5.

A cor das amostras variou desde um castanho dourado com brilho adamantino (Lavra da Generosa), até castanho amarelado de brilho comum (Lavra da Marilene, Morro Escuro e Ponte da Raiz), dependendo do grau de alteração e do local de procedência. As amostras das lavras da localidade de Euxenita são aquelas que apresentam coloração mais conspícua, mostrando-se esbranquiçadas. Os cristais de monazita não apresentam reação alguma quando excitados por luz ultravioleta, tanto na região do comprimento de onda curto como longo.

12.3. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

As análises difratométricas permitiram avaliar a composição mineralógica das amostras de monazita bem como o grau de metamictização delas. As fases minerais que ocorrem na monazita foram identificadas, como huttonita e xenotima, em proporção muito baixa. Como os espectros obtidos revelaram que a estrutura cristalina não foi destruída, o ThSiO_4 foi designado huttonita, pois segundo Lumpkin & Chakowmakos (1988), na natureza, monazita, huttonita e xenotima são invariavelmente cristalinas, enquanto zircão, torita e fergusonita frequentemente ocorrem no estado metamórfico, sendo amorfos aos raios X e à difração eletrônica. Os dados referentes à célula unitária são encontrados na Tabela 12.1.

Anthony (1965) assinala variações morfológicas, refletidas nos parâmetros da célula unitária e nos ângulos interfaciais, provocadas pelo aumento da razão La: (Sm+Gd+U+Y) e ainda relacionadas à variação do conteúdo em tório. As amostras deste trabalho apresentam variações devido à zoneamento composicional e ainda à processos de alteração.

12.4. ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO

Treze espectros foram obtidos, sendo que um deles se refere à borda de alteração (Figura 12.1). Os demais são de amostras de monazita coletadas e preparadas para análise escolhidas entre grãos desprovidos de alteração.

	B 5157	B 5157	N 5157	N 5157	B 5157	B 5157	B 5157	B 5157	N 4775
P ₂ O ₅	31,13	28,25	30,91	30,67	27,97	28,05	28,16	28,01	27,46
SiO ₂	2,22	2,33	1,21	0,80	2,48	2,17	2,41	2,26	2,75
Al ₂ O ₃	nd	0,03	0,05	nd	0,01	nd	nd	0,03	0,04
TiO ₂	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
FeO	nd	nd	0,37	nd	nd	nd	nd	nd	nd
CaO	0,15	0,15	0,60	0,36	0,13	0,14	0,12	0,14	0,14
Ce ₂ O ₃	32,34	32,92	32,26	35,19	33,09	33,41	32,96	32,86	32,91
La ₂ O ₃	13,33	13,69	14,25	14,84	13,45	13,62	13,31	13,44	13,21
Sm ₂ O ₃	1,44	1,37	1,07	1,20	0,95	1,12	1,34	1,27	0,89
Nd ₂ O ₃	9,23	9,37	9,67	9,50	8,82	9,23	9,15	9,53	8,72
Y ₂ O ₃	0,28	0,07	0,94	0,21	0,04	0,07	0,08	0,05	0,09
UO ₂	0,07	0,10	0,13	nd	0,22	0,07	0,12	0,28	0,07
ThO ₂	10,04	9,87	6,26	5,28	10,54	9,58	9,93	9,89	11,21
ZrO ₂	0,19	0,21	0,21	0,10	nd	0,06	0,14	nd	nd
Nb ₂ O ₃	nd	nd	nd	0,07	nd	nd	nd	nd	nd
Total	100,42	98,36	97,93	98,22	97,70	97,52	97,72	97,76	97,49

Fórmulas estruturais calculadas na base de 16 oxigênios

P	3,97	3,80	4,03	4,04	3,79	3,81	3,80	3,80	3,74
Si	0,334	0,370	0,186	0,124	0,397	0,348	0,384	0,362	0,442
Al		0,006	0,009		0,002			0,006	0,008
Ti									
Fe			0,048						
Ca	0,024	0,026	0,099	0,060	0,022	0,024	0,021	0,024	0,024
Ce	1,78	1,91	1,82	2,0	1,94	1,96	1,92	1,93	1,94
La	0,740	0,801	0,808	0,851	0,794	0,806	0,783	0,795	0,783
Sm	0,075	0,075	0,057	0,064	0,052	0,062	0,074	0,070	0,049
Nd	0,496	0,531	0,531	0,528	0,504	0,529	0,521	0,546	0,501
Y	0,022	0,006	0,077	0,017	0,003	0,006	0,007	0,004	0,008
U	0,003	0,004	0,005		0,009	0,003	0,005	0,011	0,003
Th	0,344	0,357	0,219	0,187	0,384	0,350	0,360	0,361	0,410
Zr	0,014	0,016	0,016	0,008		0,005	0,011		
Nb				0,006					
Total	7,80	7,90	7,90	7,88	7,90	7,90	7,89	7,91	7,91

Dados da célula unitária

a ₀	6,725 Å								
b ₀	6,899 Å								
c ₀	6,790 Å								
β	102°								
V	308,031								

Tabela 12.1 - Análises químicas de monazitas obtidas por microsonda eletrônica, contendo ainda a relação átomos por célula unitária calculada na base de 16 oxigênios e os parâmetros da célula unitária. (B=borda - N=núcleo).

	N 4775	B 4775	N 5158	B 5158	B 5158		B 5095	N 5095	N 5095
P ₂ O ₅	27,87	27,34	27,94	28,76	28,21		28,32	28,16	27,65
SiO ₂	2,41	1,92	2,33	2,27	2,43		2,37	2,25	1,83
Al ₂ O ₃	0,01	0,06	0,06	nd	0,01		0,03	nd	0,05
TiO ₂	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd
FeO	nd	0,12	nd	nd	nd		nd	nd	nd
CaO	0,11	0,30	0,13	0,14	0,13		0,28	0,27	0,41
Ce ₂ O ₃	32,94	33,12	33,25	33,17	33,44		34,64	35,08	35,41
La ₂ O ₃	13,45	13,62	13,24	13,94	13,62		14,85	14,91	15,47
Sm ₂ O ₃	0,72	1,22	1,17	0,99	1,17		0,35	0,39	0,30
Nd ₂ O ₃	9,00	9,57	9,09	9,06	9,46		7,03	6,92	6,87
Y ₂ O ₃	0,08	0,58	0,04	0,07	0,07		0,22	0,22	0,24
UO ₂	0,24	0,08	0,14	0,18	0,38		0,24	0,42	nd
ThO ₂	10,38	8,88	10,36	9,81	9,59		10,84	9,55	8,30
ZrO ₂	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd
Nb O	nd	nd	nd	nd	nd		nd	nd	nd
Total	97,21	96,81	97,75	98,39	98,51		99,17	98,17	97,53

Fórmulas estruturais calculadas na base de 16 oxigênios

P	3,80	3,77	3,79	3,84	3,79		3,79	3,80	3,86
Si	0,388	0,313	0,373	0,358	0,386		0,374	0,359	0,291
Al	0,002	0,012	0,011		0,002		0,006		0,009
Ti									
Fe		0,016					0,047		
Ca	0,019	0,052	0,022	0,024	0,022		0,047	0,046	0,070
Ce	1,94	1,98	1,95	1,92	1,95		2,00	2,05	2,06
La	0,798	0,818	0,783	0,811	0,798		0,865	0,877	0,907
Sm	0,040	0,069	0,065	0,054	0,064		0,019	0,021	0,016
Nd	0,517	0,557	0,520	0,511	0,537		0,397	0,394	0,390
Y	0,007	0,050	0,003	0,006	0,006		0,018	0,019	0,020
U	0,010	0,003	0,006	0,007	0,015		0,010	0,017	
Th	0,380	0,329	0,378	0,352	0,347		0,390	0,347	0,300
Zr									
Nb									
Total	7,90	7,97	7,90	7,88	7,92		7,92	7,93	7,92

Dados da célula unitária

a ₀	6,747 Å		6,791 Å				6,802 Å		
b ₀	6,754 Å		6,987 Å				7,000 Å		
c ₀	6,739 Å		6,510 Å				6,441 Å		
β	101°64'		103°63'				103°65'		
V	300,781		300,199				298,044		

Tabela 12.1 - continuação.

	B 4853	B 4853	B 4853	N 4853	N 4853	N 4853		Hut	
P ₂ O ₅	28,43	29,24	29,50	28,94	29,19	29,43		3,87	
SiO ₂	2,10	1,83	1,49	1,82	1,88	1,35		10,89	
Al ₂ O ₃	0,02	nd	0,02	nd	nd	0,01			
TiO ₂	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
FeO	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
CaO	0,18	0,20	0,25	1,41	1,37	1,03			
Ce ₂ O ₃	32,69	32,48	32,81	28,78	29,54	31,13		2,36	
La ₂ O ₃	9,47	9,75	10,58	9,91	9,54	11,19		0,83	
Sm ₂ O ₃	2,63	2,79	2,80	2,58	2,49	2,18			
Nd ₂ O ₃	12,34	13,46	13,67	10,97	10,73	11,57		1,18	
Y ₂ O ₃	2,30	1,89	1,15	2,06	1,67	1,71		4,42	
UO ₂	nd	nd	nd	0,39	0,26	0,19			
ThO ₂	9,59	7,80	6,12	13,14	13,21	9,59		76,45	
ZrO ₂	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
Nb ₂ O ₃	nd	nd	nd	nd	nd	nd			
Total	99,75	99,44	98,39	100,00	99,88	99,38		100,00	

Fórmulas estruturais calculadas na base de 16 oxigênios

P	3,78	3,86	3,91	3,82	3,84	3,89		0,09	
Si	0,329	0,285	0,234	0,284	0,292	0,211		0,31	
Al	0,004		0,004			0,002			
Ti									
Fe									
Ca	0,030	0,033	0,042	0,236	0,288	0,172			
Ce	1,88	1,85	1,88	1,64	1,68	1,78		0,02	
La	0,548	0,560	0,612	0,570	0,547	0,645		0,01	
Sm	0,142	0,150	0,151	0,139	0,133	0,117			
Nd	0,692	0,749	0,765	0,612	0,596	0,645		0,01	
Y	0,192	0,157	0,096	0,171	0,138	0,142		0,07	
U				0,015	0,010	0,007			
Th	0,342	0,277	0,218	0,467	0,468	0,341		0,49	
Zr									
Nb								2,99	
Total	7,94	7,92	7,91	7,95	7,93	7,95		1,99	

Dados da célula unitária

a ₀								6,746Å	
b ₀								6,952Å	
c ₀								6,428Å	
β								104°02'	
V								292,484	

Tabela 12.1 - continuação.

GENEROSA Figura 12.1 - Espectros de absorção no infravermelho de monazitas (B e C) comparados com o padrão de Moenke (1966) (A). A amostra B representa a borda alterada e a C monazita isenta de alteração.

As amostras de monazita da Lavra da Generosa são aquelas que foram mais estudadas, devido a abundância do mineral neste pegmatito. O espectro de absorção no infravermelho de exemplar desta lavra é similar ao padrão n° 5.4 de Moenke (1966). A banda de absorção de maior absorvância situada a 1.050cm^{-1} bem como a banda lateral a 955cm^{-1} são características do estiramento do ânion PO_4^{3-} . Na região de 500 a 650cm^{-1} , onde ocorrem quatro absorções (540 , 565 , 580 e 620cm^{-1}), nota-se variação da absorvância e da forma das bandas de absorção, que provavelmente sofreram interferência dos espectros das inclusões de huttonita, cheralita e xenotima contidas na monazita.

O trabalho de Hubin & Tarte (1971) apresenta a estrutura cristalina e modos normais de vibração ativa no infravermelho para o ThSiO_4 , como na torita, porém só menciona a existência de um polimorfo huttonita, monoclinico, relacionando-o à publicação de Collonques et al. (1961). Em outra referência, estes mesmos autores (Hubin & Tarte 1971) publicam espectros obtidos em diferentes intervalos de temperatura de toritas metamícticas, mostrando o efeito térmico na recristalização deste mineral, ocorrendo a possibilidade da transformação torita-huttonita. As absorções que ocorrem entre 400 e 500cm^{-1} são relativas à cheralita, xenotima e huttonita.

A fase fluida é constituída por H_2O (absorções em 3400 e 1630cm^{-1}) e CO_2 (2330cm^{-1}), presentes em todos os diagramas. As bandas de absorção a 2860cm^{-1} e 2930cm^{-1} aparecem em dez dos treze diagramas. Estas bandas são correlacionadas a hidrocarbonetos, principalmente, metano. Ocorre ainda uma banda dupla característica do ânion carbonato (1540 e 1350cm^{-1}), provavelmente como um produto de alteração do ThSiO_4 (Lumpkin & Chakowmakos 1988).

12.5. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Através do estudo por microscopia óptica pode-se observar as propriedades físicas das amostras de monazita como, cor, relevo, cor de interferência, clivagem, geminação, fratura, etc. O zoneamento característico da variação na composição química, as fraturas contendo material de coloração avermelhada, e ainda inclusões diminutas de mineral de coloração mais clara foram ainda visualizadas. Porém a identificação precisa só foi obtida através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada nos laboratórios da CBMM em Araxá.

A Micrografia eletrônica 12.1A retrata o zoneamento composicional ocorrido durante a cristalização do mineral e, ainda um sistema de fraturas que se desenvolve em duas ou mais ocasiões. Através das fraturas primárias, mais abertas, ocorreu a

penetração de água contendo íons silício e ferro, responsáveis pela transformação monazita-huttonita cuja composição foi determinada pelo sistema de dispersão de energia (EDS), representada na Figura 12.2. Esta solução retirou tório da monazita formando silicato de tório que ao se cristalizar provocou o sistema de trincas radiais mostrado na Micrografia eletrônica 12.1B. Kucha (1980) constatou que os minerais do tipo monazita-huttonita são substituídos por uma mineralização tardia de Fe-Th, e que existe uma correlação entre as razões $\text{Th: Si+F}_4 + (\text{OH})_4$ e $(\text{TR}+\text{Ca}) : \text{P}$, sendo seu valor de 1 : 1, com a soma de ambas fechando em 2.

Bruno F. Riffel, geólogo da CBMM, durante da realização das análises, comparou, em uma mesma amostra, áreas com e sem fraturas, submetendo-as a um mesmo tempo de contagem com imagem de retroespalhamento de 600S-EDS. As áreas selecionadas estão representadas nas Micrografias eletrônicas 12.1C. (área contendo principalmente monazita) e 12.1D. (área repleta de microfraturas e inclusões de ThSiO_4 na monazita), e mostram variação na cor da monazita das duas áreas. O espectro da Figura 12.3 mostra em pontos escuros a composição da monazita (relativa a Fotomicrografia 12.1C) sobre a da zona rica em microfraturas e inclusões de ThSiO_4 (mais claro), da Micrografia eletrônica 12.1D. Percebe-se um aumento nos teores de Th e Si e ainda Y que não foi assinalado nesta figura, na área microfraturada contendo huttonita.

As inclusões de silicato de tório apresentam também zoneamento composicional, (Micrografia eletrônica 12.2A), onde a porção mais clara tem maior quantidade de silício e menor de P do que a escura. Esta amostra de Nº 4853, da Fazenda Geraldo Pinho em Euxenita, MG, apresenta ainda uma inclusão de xenotima, com dimensão semelhante a da huttonita. Da amostra 5157 da Lavra da Generosa, representada na Micrografia eletrônica 12.2C. tem-se a visão da xenotima na parte superior da foto, e uma inclusão de um mineral de urânio não identificado, na porção inferior, associado à monazita. Na Lavra da Marilene, Lâmina 5191, foram identificadas também xenotima contendo Dy, Er, Yb e inclusões de um mineral de urânio com dimensão < 2 , talvez uranita. A lâmina Nº 5095 da Lavra do Morro Escuro é a que apresenta menor número de inclusões de silicato de tório e onde o microfraturamento é mais incipiente. Uma feição comum a todas as lâminas é esta apresentada pela Micrografia eletrônica 12.2C.. As bordas do cristal de monazita apresentam maior densidade de inclusões silicatadas e de microfraturas do que a porção central.

X-RAY

Live: 60s Preset: 60s Remaining:
Real: 65s 8% Dead

Figura 12.2 - Análise química qualitativa obtida por energia dispersiva de raios X em fratura primária de uma monazita (Micrografia eletrônica 12.1A), evidenciando o início de formação da huttonita.

X-RAY

Live: 60s Preset: 60s Remaining:
Real: 65s 8% Dead

Figura 12.2 - Análise química qualitativa obtida por energia dispersiva de raios X em fratura primária de uma monazita (Micrografia eletrônica 12.1A), evidenciando o início de formação da huttonita.

Micrografia eletrônica 12.1A

Micrografia eletrônica 12.1 B

Micrografia eletrônica 12.1 C

Micrografia eletrônica 12.1D

MICROGRAFIAS ELETRÔNICAS 12.1- Monazitas (Mon) da Lavra da Generosa mostrando: A) zoneamento composicional evidenciado por duas faixas inclinadas e cortadas por fraturas primárias; B) inclusões de huttonita (Hut) que ao se formar provocaram o aparecimento de inúmeras fraturas secundárias; C) área com poucas fraturas vistas por retroespalhamento; D) enxame de microfraturas e inclusões de huttonita vistas também por retroespalhamento.

A

B

Micrografias eletrônicas 12.2- Cristais de monazitas da lavra Generosa mostrando A) huttonita zonada e xenotima inclusas na monazita; B) concentração de microfraturas na borda do cristal de monazita, por onde é iniciado o processo de formação da huttonita

12.6. QUIMISMO DAS MONAZITAS E DAS FASES ASSOCIADAS

Na fórmula geral ABO_4 das monazitas o sítio A pode ser ocupado por ETR, Th, Zr, U, Ca, Fe, e Al, enquanto o sítio B é preenchido por P e Si. As fórmulas estruturais das monazitas foram calculadas na base de quatro fórmulas unitárias (f.u. # 4), ou em outras palavras, na base de 16 átomos de oxigênio.

Monazitas de três procedências foram submetidas à análises, sendo três amostras da Lavra da Generosa e uma única das outras duas, Lavra do Morro Escuro e Lavra de Euxenita.

As amostras de monazita foram analisadas em uma microsonda eletrônica Camebax da Escola de Minas de Paris (Fontainebleau) com uma tensão de 20 kV. Os limites de detecção para os elementos terras-raras e Y são estimados por cálculo quando os valores das concentrações estão nas seguintes faixas: $La_2O_3 > 0.75\%$, $Ce_2O_3 > 0.40\%$, $Nd_2O_3 > 0.55\%$ e $Y_2O_3 > 0.15\%$. O elemento será considerado em estado de traço nos casos em que ocorra em teores inferiores a estes limites.

O teor em tório destas monazitas diminui em direção à borda do cristal, sendo este dado concordante com o modelo sugerido após as análises por microscopia eletrônica, segundo o qual o tório foi retirado da monazita através da percolação da água contendo sílica e ferro encontrada nas fraturas, que por sua vez, são mais abundantes na borda do cristal (Figura 12.4). A partir desta solução foi formada a huttonita e a monazita secundária rica em lantânio, pois este elemento aumenta no sentido inverso daquele seguido pelo tório (Bilal et al. 1993).

O comportamento do cálcio é distinto de uma lavra para outra. Na Lavra da Euxenita ocorre redução na quantidade deste cátion em direção à borda do cristal, tendo sido observados cristais de cheralita nesta porção. Nas outras lavras ocorre aumento do cálcio em direção ao núcleo (Figura 12.5). O teor em Sm + Nd manteve-se praticamente invariável em todo cristal.

A relação entre os elementos que ocupam o sítio A é apresentada na Figura 12.6. Os elementos terras-raras trivalentes são substituídos por outros tetravalentes, como Th, Zr e U. O mecanismo de substituição é o seguinte:

Figura 12.4. Distribuição das monazitas no diagrama Th/La (a/f.u.: átomos por fórmula unitária). Amostra 4853 é da Lavra Euxenita, amostras 5157, 5158 e 4772 são da Lavra da Generosa e a amostra 5095 é da Lavra do Morro Escuro.

Figura 12.5. Distribuição das monazitas no diagrama (Sm+Nd)/Ca. Legenda conforme a Figura 12.4.

A razão Th/Si próxima de 1, de certas monazitas e a presença de huttonita nas zonas de alteração sugere a existência de uma solução sólida entre estes dois minerais (Figura 12.7). Certas monazitas mais ricas em Ca e pobres em Nd e Sm, mostram a razão Th/Si mais elevada ($\text{Th/Si} = 1,63$). Os ETR têm raios iônicos próximos do raio iônico do cálcio e podem ser substituídos por ele, ocorrendo neste caso a formação do terceiro membro da solução sólida, a cheralita $(\text{Ca, Ce, Th})(\text{PO}_4, \text{SiO}_4)$, (Bowie & Horne 1953, Aldred 1984 e Mannucci et al. 1986).

As proporções calculadas de huttonita e cheralita nas amostras analisadas permitem distinguir a Lavra da Euxenita como a mais rica em cheralita (1 a 10%) e pobre em huttonita (11 a 13%), enquanto as Lavras da Generosa e Morro Escuro são pobres em cheralita (1 a 2%) e mais ricas em huttonita (13 a 17%), (Bilal et al. 1993).

Através da análise dos gráficos citados, observa-se que na região estudada a soma total dos elementos terras raras cresce na direção Euxenita - Santa Maria de Itabira, da mesma forma que os teores em Ce e La. Por outro lado, os valores percentuais de Nd, Sm e Y aumentaram na direção oposta, sendo que na Lavra de Euxenita o teor em Sm é duas vezes maior do que o de outras lavras, enquanto o de Y é oito vezes maior. Os valores analíticos obtidos para monazitas das regiões de Ferros e Conceição do Mato Dentro através da espectrografia de emissão óptica, divergem quanto a direção do crescimento dos teores em Sm e ThO_2 , registrando teores muito elevados em Sm (5,3%) na amostra proveniente de Ferros e $\text{ThO}_2 = 13,7\%$ naquela procedente de Conceição do Mato Dentro (Murata et. al. 1953 e 1958). Nas amostras analisadas neste trabalho a tendência de crescimento do ThO_2 tem direção Santa Maria de Itabira - Euxenita.

Das regras semi-quantitativas apontadas no trabalho de Murata et. al. (1953), referentes as proporções das ETR na estrutura da monazita, apenas aquela que se refere à soma de Nd + La como constante com o valor de $42\% \pm 2\%$, pode ser verificada; as demais apresentaram valores díspares. As razões Nd/Ce, Y/Ce, La/Ce e $\text{Ce}/(\text{Nd} + \text{Y})$ apresentadas na Tabela 12.2 mostraram compatibilidade entre os dados obtidos por Murata et. al. (1958). (amostras 7 a 11B), e aquelas analisadas nesta tese, com exceção da monazita da Lavra de Euxenita. Este comportamento é demonstrativo de que uma das tendências de fracionamento do ETR é esta de substituição ETR-ETR. Kucha (1980), sugere que a substituição Th-ETR que ocorre na Série Monazita-Huttonita, promove uma necessidade de compensação de valência eletrostática suprida pela entrada de Ca, F e (OH). Este processo parece estar intimamente conectado com as razões Th : ETR e Si : P na microárea da estrutura cristalina.

Nº amostra	Município	Lavra	Nd/Ce	Y/Ce	La/Ce	Ce/(Nd+Y)	ff	ThO ₂
7	Ferros	Drumond	0,44	0,13	0,48	1,75	69	10,0
8	Ferros	Drumond	0,57	0,038	0,34	1,64	66	8,0
9	Conceição do Mato Dentro	Posses	0,56	0,22	0,35	1,28	61	6,7
10	Conceição do Mato Dentro	Tatu	0,36	0,013	0,14	2,70	79	13,7
11A	Sabinópolis	Generosa	0,27	0,008	0,50	3,58	85	9,4
11B	Sabinópolis	Generosa	0,29	0,008	0,51	3,39	84	8,7
5157	Sabinópolis	Generosa	0,27	0,010	0,42	3,58	82	8,9
4775	Sabinópolis	Generosa	0,26	0,011	0,40	3,45	82	10,2
5158	Sabinópolis	Generosa	0,29	0,003	0,41	3,58	82	9,9
4853	Euxenita		0,34	0,008	0,33	2,20	71	9,9
5095	Santa Maria de Itabira	Morro Escuro	0,19	0,009	0,43	4,94	87	9,6

Tabela 12.2 - Comparação entre os dados obtidos por Murata et al. (1958) para as razões indicadoras do fracionamento dos elementos terras raras e aqueles produzidos por este trabalho. As amostras de números 7, 8, 9, 10, 11A e 11B foram analisadas por Murata et al. (1958), e as amostras de números 5157, 4775, 5158, 4853 e 5095 foram analisadas por Bilal et al. (1993). - * : somatório dos elementos terras raras analisados.

12.7. CONCLUSÕES

As monazitas analisadas de pegmatitos localizados na área de tese apresentam as características listadas a seguir.

- Quanto às propriedades físicas macroscópicas, o brilho é não metálico adamantino a comum, dureza entre 5,0 e 5,5, peso específico entre 4,702 a 5,345, tendo sido observadas também a clivagem basal (001) e a partição basal (001). A forma é anédrica a subédrica e o hábito prismático ou compacto. Os cristais apresentam dimensão de 1 a 18 cm.
- Esses minerais não sofreram processo de metamictização, apresentando reflexões quando submetidas à difratometria de raios X. Os parâmetros das células unitárias mostram variações decorrentes do zoneamento químico e do processo de alteração hidrotermal. As outras fases minerais identificadas na monazita são : huttonita e xenotima.
- A espectroscopia de absorção no infravermelho permitiu identificar os componentes da fase fluida como água com absorções em 3400 e 1630cm⁻¹, CO₂ em 2330cm⁻¹ e, em alguns diagramas ocorrem bandas relacionadas a hidrocarbonetos, provavelmente metano a 2860 e

2930cm⁻¹. Foram vistas absorções relativas ao ânion carbonato a 1540 e 1350cm⁻¹. Outras absorções observadas são aquelas referentes à cheralita, xenotima e huttonita.

- Através da microscopia eletrônica de varredura foram identificadas as composições químicas das fases associadas, ThSiO₄, (Ca, La, Th, Y) (PO₄, SiO₄) e YPO₄. Foram observadas fraturas primárias contendo água Si e Fe, responsáveis pelo transporte destas substâncias vetores do processo de formação da huttonita. Ocorrem ainda fraturas radiais secundárias que partem dos cristais de huttonita e que foram produzidas pela energia de cristalização deste mineral. Esta metodologia revelou um zoneamento composicional com duas gerações de monazita. A primária rica em tório ocorre no núcleo do cristal e outra empobrecida neste elemento, aparece em torno dos cristais de huttonita. A huttonita apresenta também zoneamento composicional.
- As monazitas analisadas apresentam uma solução sólida em proporção variável de cheralita e huttonita. Os teores em Th e La destas monazitas são característicos para cada corpo e têm relação com as suas encaixantes. O enriquecimento em La acompanhado pela diminuição do Th nas monazitas, é devido ao processo de alteração ocorrido durante o estágio metassomático tardio (albitização) que afetou os pegmatitos. Durante este estágio, os fluidos hidrotermais se enriqueceram em Ca, Y, P e ETR. Os teores em U destas monazitas constituem critério para a separação entre os pegmatitos da região de Santa Maria de Itabira e os de outras áreas.

13. CONCLUSÕES FINAIS

A área onde afloram os corpos pegmatíticos estudados neste trabalho apresenta uma complexa história de evolução, envolvendo vários eventos metamórficos superimpostos, constatados através das datações das rochas dos arredores de Guanhões, analisadas por Siga Jr. (1982), e por vários outros trabalhos citados no Capítulo 7 (Teixeira et al. 1990, Dussin, I.A. 1994).

13.1. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA

As rochas gnáissicas encaixantes dos pegmatitos são de diferentes idades. Os Gnaisses Guanhões, datados em $2.666 \pm 0,51$ Ma, são as rochas mais antigas dentre as encaixantes destes pegmatitos da porção norte da área, lembrando ainda que o método aplicado foi o do Rb/Sr, logo é considerado idade mínima (Lauenstein 1984, Müller 1986). Os Granitos Borrachudos foram gerados a partir de fusão crustal desenvolvida em rochas, possivelmente granitóides orogenéticas, formadas no início do evento Transamazônico. Este modelo elaborado para explicar a gênese dos Granitos Borrachudos foi formulado por Dussin, T (1994), que submeteu a análises geocronológicas amostras do Plúton São Felix obtendo a idade de 1.729 ± 12 Ma Pb/Pb, a mesma dos riolitos que ocorrem em Conceição do Mato Dentro. O fechamento do rift do Espinhaço ocorrida em 900 Ma provocada pelo derrame dos diques máficos, originou um processo de compressão, que por sua vez pode ter ocasionado a fusão parcial das rochas graníticas, com migmatização e geração dos pegmatitos. Todos os pegmatitos da área estudada foram datados como brasileiros, com idade K/Ar entre $502,1 \pm 30,7$ Ma a $529,9 \pm 13,2$ Ma (Marciano et al. 1993). Segundo o critério adotado neste trabalho (Ginsburg et al. 1979) os pegmatitos da borda oriental do Cráton do São Francisco pertencem à PPO. Schettino et al. (1988) observou que os pegmatitos aflorantes na região de Santa Maria de Itabira se encontram grosseiramente orientados segundo a direção das fraturas das rochas encaixantes N60E, o que demonstra um condicionamento estrutural destes corpos. Cerný (1991) afirma que o número relativamente pequeno de pegmatitos anorogênicos está subordinado a algum controle estrutural, invocando para tanto exemplos do batólito de Pikes Peak e do Plúton de Wausau, além de outros.

Quanto à relação entre R_1 e R_2 estabelecida pelo gráfico de La Roche et al. (1980), as rochas discutidas acima situam-se no campo dos granitos anorogênicos,

classificação esta pouco precisa no caso dos Gnaisses Guanhães, devido à dispersão dos pontos analíticos.

Quanto ao conteúdo em ETR, as rochas discutidas acima situam-se no campo dos granitos anatóticos, ocorrendo uma grande homogeneidade nos padrões de distribuição desses elementos referentes aos Granitos Borrachudos, e novamente variações, no que diz respeito aos Gnaisses Guanhães. Duas das amostras desta última suite, provenientes da rocha encaixante do Pegmatito da Ponte da Raiz, apresentaram padrões antagônicos de distribuição dos ETR. Uma das amostras exibe anomalia negativa de Eu, enquanto a outra positiva, o mesmo ocorrendo com duas amostras de Vila Esperança. Neste último afloramento a anomalia positiva é apresentada por uma amostra de migmatito, o que coincide com a posição de Möller (1989) quanto ao padrão dos ETR apresentado pelos migmatitos anatóticos. A encaixante da Lavra da Ponte da Raiz foi afetada pelo material quartzo-feldspático do pegmatito, o que explica a anomalia positiva de Eu. Estas considerações reforçaram a hipótese de que as suites, dos Granitos Borrachudos e dos Gnaisses Guanhães são resultantes de processo de anatexia.

13.2. EVOLUÇÃO INTERNA DOS CORPOS PEGMATÍTICOS

A evolução interna dos corpos pode ser inferida a partir do conjunto de dados obtidos, principalmente no que se refere aos elementos traços incompatíveis. As razões K/Rb, K/Cs e Rb/Cs obtidas das análises de micas e feldspatos apresentam intervalos que vão desde valores muito próximos aos das rochas granitóides, até aqueles referentes aos pegmatitos menos evoluídos. Estes dados são confirmados através da relação Na/Li x Cs apresentada pelos berilos, no gráfico de Trueman & Cerný (1982), que identifica estes berilos como sendo do tipo A, oriundos de pegmatitos estéreis portadores de berilo (Marciano et al. 1994). O pequeno número de amostras analisadas em cada um dos corpos estudados, pertencentes aos grupos dos feldspatos e micas, inviabilizou a utilização dos perfis internos executados nas lavras da Generosa, Ponte da Raiz e Talho Aberto. O objetivo da elaboração destes perfis é a possibilidade de demonstrar o fracionamento dos elementos traços relacionados a estrutura zonada destes corpos.

O fracionamento dos elementos terras raras é perceptível através da relação de sucessão genética entre as fases minerais presente e sua posição estrutural de no corpo pegmatítico. Dentre os minerais portadores dos ETR, a monazita, sendo encontrada na zona intermédia, foi a primeira a se cristalizar, retirando do sistema um volume de ETR. A samarskita se forma no intervalo entre o final da cristalização da

zona intermédia e o início do processo metassomático gerador dos corpos de substituição (Cerný & Ercit 1989). A partir da cristalização da samarskita há então um enriquecimento do fluido pegmatítico residual em ETRP, tendo em vista que a composição deste último mineral é constituída por Fe, ETRL, acrescida do Dy, Gd, Nb, Ta e Ca. A euxenita, último nióbio-tantalato a se cristalizar, é rico em ETRP e Ti, esgotando assim o conteúdo final destes elementos no sistema.

O teor em F foi o responsável pela complexação do Mn, tornando a composição das columbitas bastante anômala, se confrontada com a relação Nb>Ta comparada à concentração do Mn na estrutura. O flúor é também o responsável pelo abaixamento da temperatura de cristalização cerca de 50°C (Swanson & Fenn 1992). O pequeno teor em fósforo nos pegmatitos da região de Santa Maria de Itabira foi o responsável pela pequena ocorrência de monazita nas lavras desta região, e pela introdução dos ETR, Th e Y na estrutura dos nióbio-tantalatos.

A composição dos fluidos destes sistemas foi identificada através da espectroscopia de absorção no infravermelho, como sendo formada por H₂O, CO₂ e as vezes metano. Através das análises químicas das diversas fases minerais sabe-se que além dos componentes acima citados, ocorrem ainda o F e o Cl.

O estudo das inclusões fluidas em berilo ratificou a composição química dos fluidos, mencionada no parágrafo anterior. A temperatura na qual se deu a cristalização do berilo, determinada por microtermometria é de 460°C a 310°C. Os dados obtidos através das análises dos feldspatos por difratometria dos raios X, lançados no gráfico de Mackenzie (1957) indicam uma temperatura entre 600°C a 400°C para os plagioclásios da Lavra da Generosa (Tolentino Jr. et al. 1988), e de 500°C a 200°C para a Lavra da Ponte da Raiz (Edim et al. 1988).

13.3. ZONEOGRAFIA DOS CORPOS PEGMATITOS ESTUDADOS

O Distrito de Santa Maria de Itabira como proposto por Lobato & Pedrosa Soares (1993) é representado pelos corpos pegmatíticos que afloram na porção ocidental da PPO, ou na borda oriental do Cráton do São Francisco.

Após estudos mais detalhados da mineralogia destes corpos, bem como das rochas encaixantes e suas relações com estes pegmatitos, pode-se ter uma melhor visão de todo o distrito.

Retomando o conceito de campo pegmatítico verifica-se que ele está embasado em diversos atributos como, mesma fonte ígnea, mesma idade, mesmo ambiente geológico-estrutural sendo constituído por pegmatitos de um único tipo de

formação. Inicialmente tem-se nesta região pelo menos quatro litotipos diferentes entre as encaixantes dos pegmatitos. Na região norte os pegmatitos estão encaixados nos Paragnaisses Guanhães, apresentam turmalina, não possuem fluorita ou topázio, as monazitas mostram um comportamento diferente dos seus elementos químicos, e os nióbio-tantalatos são mais ricos em Ta. A maior parte dos pegmatitos deste distrito ocorre em Ortognaisses da Suite Guanhães, apresentam amazonita, nióbio-tantalatos de composição química mais complexa do que os demais, mostram fluorita, topázio e granada. Possuem pouca monazita e não apresentam turmalina nem outro mineral de boro. Um único pegmatito, o da Lavra da Generosa, acha-se encaixado em Granito Borrachudos. Constitui o maior corpo da região, entretanto sua mineralogia é bastante similar àquela apresentada pelos corpos encaixados em ortognaisses GG, salientando os grandes cristais de monazita, berilo e nióbio-tantalatos. Os pegmatitos localizados em Rio Piracicaba estão encaixados nos Gnaisses Bicas e Monlevade, não datados e são mineralizados a fenacita. Apresentam amazonita, fluorita, berilo e nióbio-tantalatos.

Diante dos argumentos acima descritos não se pode aceitar a divisão de campos proposta por Lobato & Pedrosa Soares (1993), pois os Ortognaisses Guanhães têm 2.666 Ma e os Granitos Borrachudos 1.729 Ma, enquanto os Paragnaisses Guanhães, os Gnaisses Bicas e Monlevade não foram ainda submetidos a análises geocronológicas.

A proposição deste trabalho baseia-se na divisão do distrito em campos fundamentada no tipo de rocha encaixante, pois como foi mostrado no capítulo 8 há uma grande semelhança no comportamento geoquímico dos pegmatitos com suas encaixantes. Desta forma este distrito foi subdividido em quatro campos, a saber:

- A. Campo de Sabinópolis - pegmatitos encaixados em GB,
- B. Campo de Santa Maria de Itabira-Ferros - encaixados em Ortognaisses Guanhães,
- C. Campo de Euxenita-Serra Azul - encaixados em Paragnaisses Guanhães,
- D. Campo de Rio Piracicaba- encaixados em Gnaisses Bicas.

A representação destes campos pegmatíticos em um mapa está prejudicada devido a falta de cartas geológicas em escala adequada, podendo inclusive sofrer modificações quanto ao número e designação destes campos pegmatíticos a medida que forem produzidos trabalhos de detalhe.

Finalizando pode-se afirmar que o Distrito de Santa Maria de Itabira é consituído por quatro campos pegmatitos de acordo com as rochas encaixantes dos pegmatitos localizados na borda oriental do Cráton de São Francisco. Os pegmatitos são de idade brasileira, formados no intervalo de temperatura entre 600 e 310°C, além disto são pegmatitos cerâmicos estéreis, no que diz respeito ao conteúdo em álcalis

raros e mineralizados a berilo na variedade água marinha. São pegmatitos radioativos, semelhantes aos estudados por Lopes Nunes (1973), abissais segundo a classificação de Cerný (1990), anatóticos geralmente discordantes. Estes pegmatitos podem ser classificados ainda como pertencentes aos grupos dos pegmatitos simples, não zonados (PS) e do pegmatitos zonados simples (PZS). Em adição são enriquecidos em ETR, Y, U, F, Nb $\geq$ Ta e Fe $\geq$ Mn. Este Distrito concentra os pegmatitos menos evoluídos da Província Pegmatítica de Minas Gerais apresentando os mais baixos valores para álcalis raros.

Como conclusão final verifica-se que o Distrito de Santa Maria de Itabira concentra os pegmatitos menos evoluídos da Província Pegmatítica Oriental de Minas Gerais. Estes pegmatitos possuem valores mais baixos para os elementos alcalinos raros em toda a Província, sendo em contrapartida, isentos de elementos como Sn, B, Ta, dentre outros.

As características químicas e mineralógicas desses pegmatitos constituem critérios apontados acima e eliminam por antecipação a possibilidade de prospecção de minérios de Li, Sn e Ta na área, bem como de turmalinas coradas. Por outro lado esses copos possuem potencial no que diz respeito a utilização de feldspatos, caulim e quartzo para a indústria ceramista e vidreira. Em termos gemológicos eles têm sido explorados há longa data para água marinha, topázio azul e incolor.

14. BIBLIOGRAFIA

- ACHTSCHIN, A.B.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; JAVIER RIOS, F. 1994. Estudo de inclusões fluidas em berilos do pegmatito Ponte da Raiz, Santa Maria de Itabira, Minas Gerais. In: III Semana de Iniciação Científica da UFMG, Belo Horizonte 1994. Resumos...Belo Horizonte, 119.
- ALDRICH, L.T.; HART, S.R.; TILTON, G.R.; GERKEN, J.S. 1964. Isotope geology. In: Ann. Rept. Director, Dept. Terrestrial Magnetism, Carnegie Inst. Washington Yearbook 63: 328-340.
- ALMEIDA, F. F. M. de & HASUI, Y. eds, 1984. O Pré-cambriano do Brasil, São Paulo, S.P. Editora Edgar Blücher Ltda, 378 p.
- ANTHONY, W.J. 1965. Crystal morphology of thorium-bearing synthetic monazite. *American Mineralogist*, 50 : 1421-1431.
- ANTHONY, W.J. 1957. Hydrothermal synthesis of monazite. *American Mineralogist*, 43:p 904.
- ARMSTRONG, R.L. (1975). The geochronometry of Idaho. In: Speer, J.A. (1984). *Micas in igneous rocks*. 299-356.
- BAKAKIN, V.V.; RYLOV, G.M.; BELOV, N.V. 1970. X-Ray diffraction data for identification of beryl isomorphs. *Geochemistry International*, 7(6): 924-933.
- BANDERFER, A. & MEIRELES, H.P. 1987. Mapeamento geológico da Região do Alto Rio Guanhões (MG). Trabalho de Graduação.
- BARBOSA, A.L.M., GROSSI SAD, J.H., TORRES, N. e MELLO, M.T.V (1966) Description of the preliminary geologic map of the Middle Rio Doce, International Field Sponsored by the American Geology. Institute. III.1 a III.7.
- BARTH, T.F.W. (1969) *Feldspars*-New York and London: Willey Interscience. 261 pag.
- BATCHELOR, R.A. & BOWDEN, P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48: 45-55.
- BEUS, A.A. (1960) *Geochemistry of berillium and genetic types of beryllium, deposits*. Publ. House Academy of Sciences of USSR, 329 p em russo.

- BIGAZZI, G.; CATTANI, M.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K. (1971). Comparison between radiometric and fission track ages of micas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 43(314): 633-638.
- BILAL, E.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; SVISERO, D.P.; CORREIA NEVES, J.M. 1993a. Comparaison entre les columbo-tantalites des pegmatites du nord du Massif de Serra Dourada (Goiás) et celles des pegmatites du centre-ouest de la Province Pegmatitique Orientale (Minas Gerais). In: *Congres. Bras. Geoq.*, 4, Brasília, 1993. *Anais ... Brasília*, 151-153.
- BILAL, E.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; RIFFEL, B.F.; SVISERO, D.P.; CORREIA NEVES, J.M. 1993b. Monazitas de pegmatitos da porção centro-oeste da Província Pegmatítica Oriental. In: *Anais Simp. Geol. de Minas Gerais*, 7, Belo Horizonte. *Anais ... Belo Horizonte*, 12: 99-104.
- BOAVENTURA, R.S.; MOREIRA, C.V.R.; BOAVENTURA, F.M.C. 1977. Mapa geomorfológico (1:500.000). I.G.A. Projeto Radar, MG.
- BODNAR, R.J. & VITYKL, M.O. 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: *Short Course of the Working Group (IMA): inclusions in minerals*. Pontignano-Siena. De Vivo & Frezzotti (eds), 117-130.
- BOWIE, S.H.U. & HORNE, J.E.T. (1953). Cheralite, a new mineral of the monazite group. *Mineralogical magazine*, 30 : 93-99.
- BOWLES, J.F.W.; JOBBINS, E.A.; YOUNG, B.R. (1980). An examination of cheralite. *Mineralogical magazine*, 43 : 885-888.
- BRITO NEVES, B.B.; KAWASHITA, K.; CORDANI, U.G.; DELHAL, J. (1979). A evolução geocronológica da Cordilheira do Espinhaço: dados novos e integração. *Revista Brasileira de Geociências*, 99(1): 71-85.
- CAMERON, E.N.; JAHNS, R.H., MC NAIR, A.; PAGE, L.K. (1949). Internal Structure of granitic pegmatites. *Econ. Geol. Monogr.* 2: 115 p.
- CAMERON, E.N.; ROUVE, R.B.; WEIS, P.L. 1951. Fluid inclusions in beryl and quartz from pegmatites of the Middletown District, Connecticut. *Am. Mineral.* 36: 906-910.
- CAMERON, E.N.; ROUVE, R.B.; WEIS, P.L. 1953. Fluid inclusions in beryl and quartz from pegmatites of the Middletown District, Connecticut. *Am. Mineral.*, 38: 218-262.
- CAMERON, E.N.; JAHNS, R.H., MC NAIR, A.; PAGE, L.K. (1949). Internal Structure of granitic pegmatites. *Economic Geology Monogr.* 2: 115 p.

- CARNEIRO, F. A. & ROMEIRO, J. C. P. 1994. Mapeamento geológico de um corpo granitóide do tipo Borrachudos, na região de Dolores de Guanhanes, MG. Trabalho de Graduação, UFMG, 49 p. Inédito.
- CASSEDANNE, J.P.; CASSEDANNE, J.O.; ALVES, N.J.; CARVALHO, H.F. 1993. O pegmatito com água - marinha de Ponte da Raiz e suas paragenese Bi-Pb-(As) (município de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais). An. Acad. Bras. Ci., 65 (4): 457-458.
- CASSEDANNE, J.P. (1991). Tipologia das Jazidas Brasileiras de Gemas. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T. de; Coelho, C.E.S. eds. Principais Depósitos Minerais do Brasil: Gemas e Rochas Ornamentais. Brasília, DNPM / CPRM. 4-A: 17-39.
- CERNÝ, P. & BURT, D.M. 1984. Paragenesis, crystallochemical characteristics and geochemical evolution of micas in granite pegmatites. Mineral. Soc. America, Reviews in Mineralogy, 13: 257-297.
- CERNÝ, P. 1975. Alkali variations in pegmatitic beryls and their petrogenetic implications. N. Jb. Mineral. Abh., 123: 198-212.
- CERNÝ, P. 1982a. Anatomy and classification of granitic pegmatites. In: Mineralogical Association of Canada. Granitic Pegmatites in Science and Industry. Winnipeg, Univ. of Manitoba, 1982 a.p. 1-39. (Short Course Handbook 8).
- CERNÝ, P. 1991a Rare-element granitic. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geoscience Canada, v.18, 2: 49-67.
- CESBRON, F.P. (1986). Mineralogy of the Rare-Earth Elements. In: Lanthanides, tantalum and Niobium. Special publication N° 7 of the Society of Geology Applied to Mineral Deposits. Edited by Möller, P., Cerný, P. and Saupé, F. Springer-Verlag. Part I: 3-26
- CHEMALE Jr., F. 1987. Tektonische. lagerstat-tenkundliche und petrographische Untersuchungen im Eisenerzrevier Itabira, Minas Gerais, Brasilien. - Tese de Doutorado (ined.) 140 p., Inst. Geol. Paläont., T.U. Clausthal, Clausthal-Zellerfeld.
- CLEMENS Jr., F. 1987. Gênese das rochas graníticas do tipo Borrachudos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1. Anais ...p. 171-186.
- CLEMENS, J.D.; HOLLOWAY, J.R.; WHITE, A.J.R.. 1986. Origin of an A-type granite: Experimental constraints. American Mineralogist, 71: 317-324.
- COLLINS, P.F.L. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. Econ. Geology, 74: 1435-1444.

- COLLINS, W.J.; BEAMS, S.D.; WHITE, A.J.R.; CHAPPEL, B.W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. *Contributions Mineralogy Petrology*, 80: 189-200.
- CORDANI, U.G.; DELHAL, J.; LEDENT, D. 1973. Orogenèses Superposées dans le précambrien du Brésil sudoriental. *Revista Brasileira de Geociências*, 3(1): 1-22.
- CORDANI, U.G. & TEIXEIRA, W. 1979. Comentários sobre as determinações geocronológicas existentes para as regiões das folhas Rio de Janeiro, Vitória e Iguape. Texto explicativo para a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Folhas SF-23, SF-24 e SG-23), MME/DNPM.
- CORDANI, U.G. (1973). Evolução geológica pré-Cambriana da faixa costeira do Brasil entre Salvador e Vitória. São Paulo, 98 p. Tese de Livre Docência. Inst. Geociências, U.S.P.
- CORREIA NEVES, J.M.; PEDROSA SOARES, A.C.; MARCIANO, V.R.P.R.O. 1986. A província pegmatítica oriental do Brasil à luz dos conhecimentos atuais. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1): 106-118.
- CORREIA NEVES, J.M.; PEDROSA SOARES, A.C.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; MONTEIRO, R.L.B.P.; SOUZA FERNANDES, M.L. (1987). Grantoides and Pegmatites from the Northern Section of the Eastern Brazilian Pegmatite Province. *Excursion Guides Book ISGAM/87 Salvador / Bahia*: 125-144.
- CORREIA NEVES, J.M.; MONTEIRO, R.L.B.P.; DUTRA, C.V. 1984. Composição química de berilos pegmatíticos do Brasil e seu significado petrológico e metalogenético. *Rev. Bras. Geoc.*, 14: 137-146.
- CORREIA NEVES, J.M. (1962) Pegmatitos da Região da Venturinha (Penalva do Castelo, Viseu). *Memórias e Notícias*, v.54, p. 1-153.
- CORREIA NEVES, J.M. (1981) Pegmatitos Graníticos. Trabalho escrito para concurso a professor titular do I.G.C.-U.F.M.G. 251 p.
- CORREIA NEVES, J.M. (1990) Interpretação metalogenética da geoquímica de feldspatos e micas em pegmatitos do Alto Ligonha (Moçambique). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal. *Anais. Natal, RN*, 938-942
- CRAWFORD, M.L. 1981. Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. In: L.S.Hollister and M.L.Crawford (eds). *Short course in fluid inclusions: Applications to petrology. Mineral.Soc. of Canada*, 6: 157-181.
- DANA (1892) *The System of Mineralogy*, 6th ed. , John Wiley & Sons , New York.

- DEBON, F. & LE FORT, P. 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. - Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sciences, 73 (for 1982), 135-149.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1966. Minerais constituintes das rochas. Uma introdução. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa. 558.p.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1966. An introduction to the Rock forming Minerals. John Wiley and Sons, Inc., Nova York, 528 p.
- DIRAC, F.M. & EBERT, M. 1967. Isotopic ages from the Pegmatite Province of Eastern Brazil. Nature, v.215, August, 26. p. 948-949.
- DORR, J.V.N. & BARBOSA, A.L.M. 1963. Geology and ore deposits of the Itabira District, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey. Professional Paper, 641-A: 110p. Washington.
- DOSSIN, I.A.; DOSSIN, T.M.; CHARVET, J.; COCHERIE, A.; ROSSI, P. 1993. Single-Zircon dating by step-wise Pb-evaporation of Middle Proterozoic magmatism in the Espinhaço Range, southeastern São Francisco Craton (Minas Gerais, Brazil). In: Simp. Sobre o Cráton do São Francisco; Sua evolução tectônica e metalogenética, 2. Salvador, 1993. Anais... Salvador, SBG-BA, SE/SGM.: 39-42.
- DOSSIN, I.A. & DOSSIN, T.M. (1986). Geologia, metalogenia e evolução tectônica da região do Vale do Rio Guanhanes. Minas Gerais. CGE. Diamantina, 48p. (inédito).
- DRAKE, M.J. & WEILL, D.F. (1975). Partition of Sr, Ba, Ca, Y, Eu^{2+} , Eu^{3+} , and other REE between plagioclase feldspar and magmatic liquid: an experimental study. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 39: 689-712.
- DRUMOND, J.B.V. 1985. Ipatinga. Folha SE 23-Z-D. Região Sudeste. In: Projeto mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais. Texto e mapas: carta metalogenética; carta de previsão de recursos minerais; carta de previsão para planejamento de ações governamentais: DNPM, 15p.
- DUSSIN, I.A. 1994. Evolution structurale de la region de l' Espinhaço Méridionale, bordure sud-est du Craton São Francisco Brésil. Tectoniques superposées au Proterozoïque. Tese de doutoramento. Université d'Orléans, 200p. inédito.
- DUSSIN, T.M. 1994. Associations volcano-plutoniques de l' Espinhaço Méridional (SE-Brésil): Un exemple d'évolution de la Croûte Proterozoïque. Orléans, França, 177p. (Tese de doutorado, Univ. Orléans).
- EDIM, N.R.J.; PROCÓPIO, P.M.; OLIVEIRA, J.L.M. 1988. Mapeamento geológico da região de Santa Maria de Itabira e contribuições ao estudo do pegmatito Ponte da Raiz. Trabalho de Graduação. I.G.C. - U.F.M. G. 126p. (inédito).

- FANTON, J.J.; ARIOLI, E.E.; MOURA, O.J.M. (1978) Pegmatitos da Região da Galiléia-Mendes Pimentel - (Minas Gerais) .Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia vol.4 , 1770-1781 .
- FARMER, V.C. (1974) The infrared spectra of minerals. Mineralogical Society, Monograph 4. London. 539p.
- FERNANDES, M.L.S.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; OLIVEIRA, R.C.; DILÁSCIO, M.V.; CORREIA NEVES, J.M.. 1994. Petrografia e geoquímica de rochas granito-gnáissicas de região entre Itabira e Dolores de Guanhae, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38. Camboriu, 1994. Boletim de resumos expandidos, p.176-177.
- FERNANDES, M.L.S.; MARCAIANO, V.R.P.R.O.; OLIVEIRA, R.C.; CORREIA NEVES, J.M.; DILÁSCIO, M.V. 1994. Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. Geonomos, v.2, 2: 23-29.
- FERSMAN, A.E. 1931. Les pegmatites.Acad. Sci. U.R.S.S., tradução francesa do original russo sob a direção de R. du Trier de Terdonck e J. Thoreau, editada em Louvain, 1951.
- FERSMAN, A.E. 1940. Pegmatites. Third Edition. In: Selected Works VI: Academy of Sciences of the U.R.S.S., Moscow. (In Russo, reimpressão 1960).
- FOORD, E.E. & MARTIN, R.F. (1979) Amazonite from Pikes Peak Batholith. Mineralogical Record, v.10, p. 109-110.
- FOORD, E.E. 1986. Crystal chemistry and origin of color of amazonite, particularly that from the Pikes Peak Batholith, Colorado.In: Colorado Pegmatite Symposium, Colorado Chapter, Friends of Mineralogy, 77-83.
- FRONDEL, C. 1958. Systematic mineralogy of uranium and thorium, U.S. Geological Survey Bulletin, 1064.
- GANDINI, A.L.; BELLO, R.M.S.; FUZIKAWA, K.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; PIMENTA, M.A.; SVISERO, D.P. 1992. Microtermometria, absorção no infravermelho e Espectroscopia Micro-Raman dos componentes Químicos das inclusões fluidas dos topázios imperiais de Ouro Preto, MG. In.: Congr. Bras. Geol., 37, São Paulo, 1992. Anais... São Paulo, SBG-São Paulo, v.2, p. 23 e 24.
- GANDINI, A.L.; BELLO, R.M.S.; FUZIKAWA, K.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; PIMENTA, M.A. et al. 1993. Aspectos mineralógicos, geoquímicos e genéticos do topázio imperial de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. In.: IX Semana de Geoquímica e

- Congr. de Geog. dos Países de Língua Portuguesa, Porto, 1993. Memórias N° 3. Porto. p. 233 a 237.
- GINSBURG, A.I.; TIMOFEYEV, I.N.; FELDMAN, L.G. 1979. Principles of geology of the granitic pegmatites. Nedra Moscow, 296 p.; in Russian. In: Cerný, P. (1982a).
- GINSBURG, A.I., 1960. Specific geochemical features of the pegmatitic process: International Geological Congress, 21st Session Norden, Report, Part 17, p. 111-121.
- GOLDSCHMITH, J.R. & LAVES, F. 1954. Potassium feldspars structurally intermediate between microcline and sanidine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.6, 100-118.
- GOLDSMITH, J.R. & LAVES, F. 1954. The microcline - sanidine stability relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 5: 1-19.
- GOLDSCHMITH, V.M. 1958. *Geochemistry*. Clarendon Press, Oxford, 730 pag
- GOLFARI, L. (1975). Zoneamento ecológico do Estado de Minas Gerais para reflorestamento. Prodepef. Série Técnica, Belo Horizonte, n°3, 65p.
- GORDIYENKO, V.V., (1971). Concentration of Li, Rb and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare metal mineralization in granite pegmatites: *International Geology Review*, v. 13, p. 134-142.
- GROSSI SAD, J.H.; MAGALHÃES, J.M.M.; CARELOS, P.M. 1989. *Geologia do Distrito de Guanhanes, Minas Gerais*. Belo Horizonte, GEOSOL/DOCEGEO, 252 p. Relatório interno.
- GROSSI SAD, J.H.; CHIODI FILHO, C.; SANTOS, J.F.; MAGALHÃES, J.M.M.; CARELOS, P.M. 1990. Duas suites graníticas do bordo sudeste do Cráton Sanfranciscano, em Minas Gerais: petroquímica e potencial metalogenético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Anais...4: 1836-1848.
- HARGRAVES, R.B. 1976. Precambrian geologic history. - *Science* 193, N° 4251, 363-371.
- HARGRAVES, R.B. 1981. Precambrian tectonic style: a liberal uniformitarian interpretation. - Chap. 2, p. 21-56, in A. Kröner (editor): *Precambrian plate tectonics*, 781 p., *Developments in Precambrian Geology* 4, Elsevier, Amsterdam, NY.
- HARRISON, T.M.; ARMSTRONG, R.L.; NAESER, C.W.; HAKAL, J.E. 1979. Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Canadian J. Earth Science* 16, 400-410.
- HASUI, Y.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; DELHAL, J. 1976. Geocronologia da região do Médio Rio Doce, MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. Boletim de Resumos... Belo Horizonte, SBG, 211-212.

- HEIER, K.S. & TAYLOR, S.R. 1959a. Distribution of Li, Na, K, Rb, Cs, Pb, and Tl southern Norwegian precambrian alkali feldspars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, G.B., 15: 284-304.
- HEIER, K.S. & TAYLOR, S.R. 1959b. Distribution of Ca, Sr, and Ba in Southern Norwegian precambrian alkali feldspars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, G.B., 17: 286-304.
- HEINRICH, E. Wm. 1948. Pegmatites of Eight Mile Park, Fremont County, Colorado. *American Mineralogist*, vol. 33, 420-448, 550-558.
- HEINRICH, E. Wm. 1964. Tin-tantalum-lithium pegmatites of the São João del Rei district, Minas Gerais, Brasil. *Economic geology*, vol 59, 982-1002.
- HENDERSON, P. 1984. Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo, 510p.
- HERRGESELL, G. & PFLUG, R. 1985. The thrust belt of the southern Serra do Espinhaço. Minas Gerais, Brasil. *Monst. Forsch. zbl. Geol. Paleont. Teil I.* 9/10: 1405-1414.
- HERZ, N.; HURLEY, P.M.; PINSON, W.H.; FAIRBAIRN, H.W. 1961. Age measurements from a part of the Brasilien shield. *Geological Society of America*, 72: 1111-1120.
- HERZ, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 641-B, 58p. Washington.
- HOFMEISTER, A.M. 1984. A spectroscopic study of amazonite: irradiative coloring of structurally hydrous, Pb-bearing feldspar. *American Mineralogist*, v. 70, P. 794-804.
- HOFMEISTER, A.M., & ROSSMAN, G.R. 1981. The effect of radiation on water and lead in potassium feldspar (abs.): *Geological Society of America, Abst.*, p. 474.
- HORN, A.H. & CORREIA NEVES, J.M. 1992. Campo Pegmatítico de Manhauçu-Espera Feliz (Porção Centro-Sul da Província Pegmatítica Oriental, Minas Gerais-Brasil). *Enquadramento Geológico, Mineralogia e Geoquímica*, *Revista Escola de Minas de Ouro Preto*, 45(1e2): 196-198.
- HUBIN, R. & TARTE, P. 1971. Application de la spectrométrie d'absorption infrarouge à l'étude de la recristallisation de thorites métamictes. *Bulletin de la Société Française de Mineralogie et Cristallographie*, 94 : 471-476.
- JAHNS, R.H. 1953a. The genesis of pegmatites (I): Occurrence and origin of giant crystals. *American Mineralogist*, vol 38, 563-598.

- JAHNS, R. H. 1953b. The genesis of pegmatites (II) : Quantitative analysis of lithium-bearing pegmatite , Mora County , New Mexico. *America Mineral.* 38 , 1078-1112.
- JAHNS , R.H. 1955. The study of pegmatites. *Econ. Geol.* 50 th. Anniv. vol, 1025-1130
- KUCHA, H. 1980. Continuity in the monazite-huttonite series. *Mineralogical Magazine.* 43:1031-1034.
- KUSMENKO, M.V. et al. 1976. Fields of rare-element granitic pegmatites. Nauka Moscow, 332 p.; in Russian. In: Cerný, P. (1982a).
- LA ROCHE, H. DE 1980. Granites chemistry through multicationic diagrams. *Sci. de la Terre Inf. Geol.*, 13, 65-88.
- LANDES, K. K. 1932. The Barringer Hill, Texas, pegmatite. *The American Mineralogist* , vol. 17 , 381-390.
- LANDES, K. K. 1933. Origin and classification of pegmatites. *The American Mineralogist*, vol. 18 , nº 2 , 33-56 e 95-103
- LATHI, S.I. & KINNUNEN, K.A. 1993. A new gem beryl locality: Luumäki, Finland. *Gems & e Gemology*, 30-37.
- LAUENSTEIN, H.J. 1984. Mineralogisch-petrographische Untersuchungen an ausgewählten Eisenerzkörpern und deren Nebengesteinen am Ostrand des Eisernen Vierecks, Minas Gerais, Brasilien. Clausthal, Alemanha, 233p. (Tese de doutorado, Fakultät der Technischen Universität Clausthal).
- LEDENT, D. & PASTEELS, P. 1968. Determinations de l'âge des roches post-tectoniques du sud-est du Brésil. *Ann. Soc. Géol.*, v. 91. p. 305-309.
- LEONARDOS, O.H.; FYFE, W.S.; FUCK, R.A. 1976. Panafrikan thrusting and melting, within the brasilian continental margin. *An. Acad. bras. Ciênc.* 48: 153-158.
- LOBATO, L.M. & PEDROSA SOARES, A.C. 1993. Síntese dos recursos minerais do Cráton do São Francisco e faixas marginais em MG. *Geonomos*, 1 (1): p. 51-64.
- LOPES NUNES, J.E. 1973. Contribution à l'étude minéralogique et géochimique des pegmatites du Mozambique. *Sciences de la Terre*, Mím.28: 1-201.
- LUMPKIN, R.G. & CHAKOUMAKOS, B.C. 1988. Chemistry and radiation effects of thorite-Group minerals from the Harding pegmatite, Taos County, New Mexico. *American Mineralogist*, 73 : 1405 - 1419.
- MACEDO, W.A.A.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P. 1992. Mössbauer characterization of biotites from zoned pegmatites. In: Congr. Latinoamericano de Espectroscopia Mössbauer: Lacame'92, Buenos Aires, 1992. Anais... Buenos Aires.

- MACEDO, W.A.A.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P. 1994. Mössbauer characterization of biotites from zoned pegmatites. *Hyperfine Interaction* 83: 483-487.
- MACHADO, N., SCHRANK, A., ABREU, F.R.D., KNAUER, L.G., ALMEIDA ABREU, P.A. 1989. Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço meridional. - In: 5º Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Anais, 171/174, SBG Núcleo Minas Gerais, Bol. 10, Belo Horizonte.
- MACKENZIE, W.S.(1957) The orthoclase-microcline inversion. *Mineralogical Magazine*, v.30, 225: 354-366.
- MANIAR, P.D. E PICCOLI, P.M. (1989): Tectonic discrimination of granitoids. - *Geol. Soc. Amer., Bull.*, 101, 635-643.
- MARCIANO, V.P.R.O. 1985. Contribuição ao estudo da mineralogia e geoquímica de pegmatitos da região de Governador Valadares, Minas Gerais. São Paulo, (Dissertação de Mestrado, IG-USP). 213p (inédita).
- MARCIANO, V.R.P.R.O.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P.; QUINTÃO, N.H.; SILVA, L.C.T. 1992a. Pegmatitos do bordo sudeste do Cráton do São Francisco, em Minas Gerais: localização, características morfo-estruturais e mineralogia. In: *Simp. Geol. Minas Gerais*, 6. Ouro Preto, 1992. *Rev. Esc. Minas de Ouro Preto*, 45 (1,2): 199-201.
- MARCIANO, V.R.P.R.O.; RIFFEL, B.F.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P. 1992b. Estudo preliminar de nióbio-tantalatos da borda centro-oeste da Província Pegmatítica Oriental. In: *Anais do Congr. Bras. Geol.*, 37. São Paulo, 1992. *Anais...São Paulo, SBG_SP*, 2: 23-24.
- MARCIANO, V.R.P.R.O.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P.; CASTILHO, D.L.; ROMEIRO, J.C.; FARIA, L.F. 1992c. Classificação dos corpos pegmatíticos da borda oriental do Cráton Sanfranciscano, através do estudo das moscovitas. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, 37. São Paulo, 1992. *Anais...São Paulo, SBG_SP*, 2: 5-6.
- MARCIANO, V.R.P.R.O.; SVISERO, D.P.; CORREIA NEVES, J.M. 1993. Dados geocronológicos de pegmatitos da borda oriental do Cráton do São Francisco. In: *Simp. sobre o Cráton do São Francisco: sua evolução tectônica e metalogenética*, 2. Salvador, 1981, *Anais... Salvador, SBG - Ba/SGM*, p.362-365.
- MARCIANO, V.R.P.R.O.; RIOS, F.J.; ACHTSCHIN, A.B.; CORREIA NEVES, J.M.; SVISERO, D.P. 1994. Berilos de pegmatitos de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais. *Geonomos*, v.2, 2: 41-50.

- MARTIN, R.F. 1982. Quartz and feldspars. Mineralogical Association of Canada. Short Course Handbook, v.8, p 41-62.
- MASCARENHAS, J. de F. & GARCIA, T.W. 1989. Mapa geocronológico do Estado da Bahia; texto explicativo. Salvador, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 186 p.
- MEGAW, H.D. 1974. The architecture os the feldspars. The feldspars. Edited by Mackenzie, W.S. e Zussman, J. Manchester University Press, 2-24.
- MENDES, J.C. & SVISERO, D.P. 1993. Aspectos mineralógicos e geoquímicos dos berilos do Pegmatito do Cruzeiro, São José da Safira. In: Simp. sobre o Cráton do São Francisco: sua evolução tectônica e metalogenética, 2. Salvador, 1993, Anais... Salvador, SBG-BA, SE/SGM. p. 365-368.
- MENDES, J.C. 1989. Aspectos mineralógicos, geológicos e econômicos da esmeralda de Santa Terezinha de Goiás. São Paulo. (Dissertação de Mestrado, IG/USP) 163p.
- MIDDLEMOST, E.A.K. 1988. Magmas and magmatic rocks. - Reprint, 266 p., Longman Scientific & Technical, Lonfdon.
- MOENKE, H.H.W. 1962. Mineralspektren, I. Akademie-Verlag, Berlin.
- MOENKE , H.H.W. 1962. Mineralspektren , II. Akademie-Verlag.Berlin.
- MOENKE, H.H.W. 1974. Vibrational spectra and the crystal-chemical classification of minerals. In: the infrared spectra of minerals, Edited by V>C>Farmer. Mineralogical Society Monograph 4. Cap 7 : 111-118.
- MÖLLER , P. 1986. Rare earth mineral deposits and their industrial importance.In : Lanthanides , tantalum and Neobium.Special publication Nº 7 of the Society of Geology Applied to Mineral Deposits Edited by Möller , P. ; Cerný , P. ; Saupé , F.Springer-Verlag , Part I : 146-171.
- MÖLLER, P & MUECKE,G.K. 1984. Significance of the EU anomalies in silica melts and crystal melt equilibria: a re-evaluation. Contributions of Mineralogy and Petrology, 87: 242- 250
- MONTEL, J.M.; LHOTE, F.; CLAUDE, J.M. 1989. Monazite end members and solid solutions : synthesis , unit-cell characteristic , and utilization as microprobe standards.Mineralogical Magazine , 53 : 120-123.
- MOURA, O.J.M.; FANTON, J.J.; ARIOLLI, E.A. 1978. Geologia da Região de Galiléia-Mendes Pimentel (Minas Gerais). In: Congr. Bras. Geol., 30, Recife, 1978, Anais... Recife, SBG-Recife,1: 27-37.

- MARTIN, R.F. 1982. Quartz and feldspars. Mineralogical Association of Canada. Short Course Handbook, v.8, p 41-62.
- MASCARENHAS, J. de F. & GARCIA, T.W. 1989. Mapa geocronológico do Estado da Bahia; texto explicativo. Salvador, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 186 p.
- MEGAW, H.D. 1974. The architecture of the feldspars. The feldspars. Edited by Mackenzie, W.S. e Zussman, J. Manchester University Press, 2-24.
- MENDES, J.C. & SVISERO, D.P. 1993. Aspectos mineralógicos e geoquímicos dos berilos do Pegmatito do Cruzeiro, São José da Safira. In: Simp. sobre o Cráton do São Francisco: sua evolução tectônica e metalogenética, 2. Salvador, 1993, Anais... Salvador, SBG-BA, SE/SGM. p. 365-368.
- MENDES, J.C. 1989. Aspectos mineralógicos, geológicos e econômicos da esmeralda de Santa Terezinha de Goiás. São Paulo. (Dissertação de Mestrado, IG/USP) 163p.
- MIDDLEMOST, E.A.K. 1988. Magmas and magmatic rocks. - Reprint, 266 p., Longman Scientific & Technical, London.
- MOENKE, H.H.W. 1962. Mineralspektren, I. Akademie-Verlag, Berlin.
- MOENKE, H.H.W. 1962. Mineralspektren, II. Akademie-Verlag, Berlin.
- MOENKE, H.H.W. 1974. Vibrational spectra and the crystal-chemical classification of minerals. In: the infrared spectra of minerals, Edited by V.C. Farmer. Mineralogical Society Monograph 4. Cap 7 : 111-118.
- MÖLLER, P. 1986. Rare earth mineral deposits and their industrial importance. In : Lanthanides, tantalum and Neobium. Special publication Nº 7 of the Society of Geology Applied to Mineral Deposits Edited by Möller, P.; Cerný, P.; Saupé, F. Springer-Verlag, Part I : 146-171.
- MÖLLER, P & MUECKE, G.K. 1984. Significance of the EU anomalies in silica melts and crystal melt equilibria: a re-evaluation. Contributions of Mineralogy and Petrology, 87: 242-250
- MONTEL, J.M.; LHOTE, F.; CLAUDE, J.M. 1989. Monazite end members and solid solutions : synthesis, unit-cell characteristic, and utilization as microprobe standards. Mineralogical Magazine, 53 : 120-123.
- MOURA, O.J.M.; FANTON, J.J.; ARIOLLI, E.A. 1978. Geologia da Região de Galiléia-Mendes Pimentel (Minas Gerais). In: Congr. Bras. Geol., 30, Recife, 1978, Anais... Recife, SBG-Recife, 1: 27-37.

- MOURA, O.J.M.; PINHEIRO, S.O.; NASSIF, M.A. 1981a. Gemas de Minas Gerais. Metais de Minas Gerais S.A. Metamig. Belo Horizonte. 75p.
- MOURA, O.J.M.; PINHEIRO, S.O.; NASSIF, M.A. 1981b. Gems from Brazil. Metais de Minas Gerais S.A. Metamig. Belo Horizonte. 60p.
- MÜLLER, G.; HOHNDORF, A.; LAUENSTEIN, H.J.; LENZ, H. 1986. Petrological and geochemical data on high-metamorphic Archean Bif-bearing rock sequence near Guanhões, Minas Gerais, Brazil. *Geol. Jb. D.79*, pp. 3-20. Hannover.
- MURATA, K.J.; ROSE, H.J.; CARRON, M.K. 1953. Systematic variation of rare earths in monazite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4:292-300.
- MURATA, K.J.; DUTRA, C.V.; TEIXERA DA COSTA, M.; BRANCO, J.J.R. 1958. Composition of monazites from pegmatites in eastern Minas Gerais, Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 16 : 1-14.
- NRIAGU, J.O. 1984. Phosphate Minerals: Their properties and general modes of occurrence. In: *Phosphate Minerals*, edited by Nriagu, J.O. & Moore, P.B., Springer - Verlag, New York . Chapter 1.1-136.
- PABST, A. & HUTTON, C.O. 1951. Huttonita, a new monoclinic thorium silicate. *American Mineralogist*, 36 : 60-9.
- PAIVA, G. 1946. Províncias pegmatíticas do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Bol. 78. p.13-21.
- PEARCE, J.A., HARRIS, N.B.W. E TINDLE, A.G. 1984. Trace element discriminations diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25 (4), 956-983.
- PECORA, W.T. & BARBOSA, A.L.M. 1945a. Mica. Lavra do Bananal, Peçanha - Minas Gerais. Divisão do Fomento da Produção Mineral, DNPM, Boletim avulso n° 67, 32p.
- PECORA, W.T. & BARBOSA, A.L.M. 1945b. Mica na serra dos Lourenços, Peçanha Minas Gerais. Divisão do Fomento da Produção Mineral, DNPM., Boletim avulso n° 68, 42p.
- PECORA, W.T.; KLEPPLER, H.R.; LARRABEE, D.M.; BARBOSA, A.L.M.; FRAYA, R. 1949. Mica deposits in Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Survey Bull*, 964-C, 305 p.
- PEDROSA SOARES, A.C.; CORREIA NEVES, J.M.; LEONARDOS, O.H. 1990. Tipologia dos Pegmatitos de Coronel Murta-Virgem da Lapa, Médio Jequitinhonha, Minas Gerais, *Revista Escola de Minas de Ouro Preto*, 43(4): 44-54.
- PUTZER, H. 1976. Metallogenetische provinzen in Suedamerika. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuschhandlung, 318p.

- QUEMÉNÉUR, J.J.G. & GÁRCIA, D. 1993. Os Maciços de Tabuões e Ritópolis na Região de São João del Rei, granitóides transamazônicos com a associação granito-trondhjornito-pegmatito. In: Simp. Geol., Minas Gerais, 7, Simp. Nac. de Est. Tect., 4, Workshop Geologia Estrutural dos Minérios de Ferro, Belo Horizonte, 1993. Anais... Belo Horizonte, SBG-MG. p. 105-107.
- REEVES, R.G. 1966. Geology and mineral resources of Monlevade and Rio Piracicaba quadrangles, Minas Gerais, Brasil: U.S. Geological Survey, Prof. Paper 341E, 58p.
- RIBBE, P.H. 1975. The chemistry, structure and nomenclature of feldspars. Mineralogical Society of America. Short Course Notes, vol. 2 : Feldspar Mineralogy, R1-R52.
- ROEDDER, E. 1951. Composition and significance of fluid inclusions in minerals. Geol. Soc. Amer., Bull. 62: 1472.
- ROEDDER, E. 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy. Mineral. Soc Amer. v.12, 644p.
- SÁ, J.H.S. 1977. Pegmatitos litíferos da região de Itinga-Araçuaí, Minas Gerais. São Paulo, 112 p. Tese de doutoramento. Inst. Geociências, USP. .
- SCHALLER, W. T. 1925. The genesis of lithium pegmatites. American Journal Science, 5 th Series, vol. 10 , 269-279
- SCHETTINO, A.; MACHADO NETO, O.; GIACROMI, W 1988. Geologia da região de Santa Maria de Itabira (MG). Trabalho de graduação. IGC/UFMG. 72p. (inédito).
- SCHOBENHAUS, C.; ALMEIDA, C.D.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. 1984. Geologia do Brasil - Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, 501p.
- SCHORSCHER, H.D. E LETERRIER, J. 1980. Metasomatic formation of granitic rocks: Petrology and Chemistry. - 26th. Inter. Geol. Cong., Abstracts, v. I, p. 87, Paris.
- SCHORSCHER, H.D. E MÜLLER, G. 1977. Granitisation tiefkrustaler Mylonite durch metasomatische Feldspatisierung im Präkambrium E-Brasilien. Fortschr. Miner. 55, Beih. 1, 123-124.
- SCHORSCHER, J.H.D. 1992. Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos Pré-cambrianos do sudeste de Minas Gerais: Quadrilátero Ferrífero, Espinhaço Meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes. São Paulo, 273p. (Tese de Livre-Docência-IG-USP).
- SHIEH, V.N. & TAYLOR, H.P. 1969. Oxygen and hydrogen isotope studies of contact metamorphism in the Santa Rosa Range, Nevada and others areas. Contrib. Mineral. Petrol. 20, 306-356.

- SIGA Jr., O.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; BASEI, M.A.S.; TAYLOR, P.N. 1987. Aplicação dos isótopos de Sr e Pb nas rochas gnáissco migmatíticas de Itacambira-Barroco. Anais do 4 Simp. Geol. de Minas Gerais. Bol. 7, pp. 45-57.
- SIGA Jr., O.; TEIXEIRA, W.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; DELHAL, J. 1982. O padrão geológico-geocronológico das rochas de alto grau da parte setentrional da Faixa Ribeira, a norte do Rio de Janeiro, Brasil. 5 Congr. Latinoamer. Geol. Argentina, Actas, 1: 349-370.
- SIGA Jr., O. 1982. Geocronologia da Folha SE-23 Belo Horizonte. Projeto RADAM-BRASIL. Boletim Interno, 61p. (inédito).
- SINKANKAS, J. 1981. Emerald and other beryls Radnor Pennsylvania. Chilton Book Company. 665p.
- SMITH, J.V. 1974a. Feldspar Minerals, vol.1. Crystal Structure and Physical Properties. Springer-Verlag, Berlim, 622 pag.
- SMITH, J.V. 1974b. Feldspar Minerals, vol.2. Chemical and textural properties. Springer-Verlag, Berlim, 690 pag.
- SOUZA FERNANDES, M.L.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; OLIVEIRA, R.C.; DILÁSCIO, M.V.; CORREIA NEVES, J.M. 1994. Petrografia e Geoquímica de Rochas granito-gnáissicas da região entre Itabira e Dolores de Guanhanes, MG. In: Congr. Bras. Geol., 38. Balneario Camboriú, 1994. Anais... Balneario Camboriú, SBG-Santa Catarina. p. 176-177.
- SOUZA FERNANDES, M.L.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; OLIVEIRA, R.C.; CORREIA NEVES, J.M.; DILÁSCIO, M.V. 1995. Granitos Borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. 9 páginas. (submetido à Geonomos e aceito), no prelo.
- SOUZA, C.J.D. & SAADI, A. 1994. Contribuição à geomorfologia da Bacia do Rio Doce. In: Simpósio de Geografia Física Aplicada, 5, São Paulo. Anais... São Paulo. 157-161.
- SOUZA, J.L.; MENDES, J.C. & SVISERO, D.P. 1987. Aspectos mineralógicos e geológicos das esmeraldas brasileiras. Rev. Esc. Minas de Ouro Preto, 40(3): 18-26.
- SOUZA, J.L.; MENDES, J.C.; SVISERO, D.P.; BELLO, R.M.S. & VALARELLI, J.V. 1990. Estudos petrográficos e mineralógicos da esmeralda da jazida de Capoeirana, Nova Era, Minas Gerais. In: Congr. Bras. Geol., 36, 1990. Natal. Anais...Natal, SBG, 3: 1389-1402.
- SOUZA, J.L. & SVISERO, D.P. 1987. Estudo óptico e roentgenográfico de inclusão de esmeralda da jazida de Itabira, Minas Gerais. In: Simp. Geol. Minas Gerais, 4, Belo Horizonte, 1987. Anais...Belo Horizonte, SBG, 7: 329-342.

- SOUZA, J.L. 1989. Mineralogia e geologia da esmeralda da jazida de Itabira, Minas Gerais. São Paulo (Dissertação de Mestrado IG-USP), 192p.
- SPEER, J.A. 1984. Micas in igneous rocks. In: Mineralogical Society of America. Micas. S.W. Bailey, editor. p. 299-356. (Reviews in Mineralogy v.13).
- SVISERO, D.P. & FRANCO, R.R. 1987. A Província gemológica brasileira. Revista Escola de Minas de Ouro Preto, 40(3) p.37-42.
- SVISERO, D.P. & FRANCO, R.R. 1991. A Província gemológica brasileira. In: Schobbenhaus, C.; Queiroz, E.T. de; Coelho, C.E.S. eds. Principais Depósitos Minerais do Brasil: Gemas e Rochas Ornamentais. Brasília, DNPM/CPRM. v.4. 9-16p.
- SWANSON, S.E. & FENN, P.M. 1992. The effect of F and Cl on the kinetics of albite crystallization: A model for granitic pegmatites? Canadian Mineralogist, v30, 549-559p.
- TEIXEIRA, W.; DOSSIN, I.A.; DOSSIN, T.M.; SALVADOR, E.D.; SIGA Jr., O.; SATO, K. 1990. Interpretação do contexto geotectônico do embasamento na borda leste do sistema Espinhaço, região de Guanhães e Gouveia-MG, com base numa integração do seu conjunto geocronológico U/Pb, Rb/Sr e K/Ar. In: Congr. Bras. Geol., 36, Natal, 1990. Anais...Natal, SBG, 1990, v.6, p. 2711-2722.
- TOLENTINO JR., J.; FONSECA, M.B.; PARIZZI, M.G. 1988. Estudo geoquímico e petrológico do Pegmatito da Lavra da Generosa do Município de Sabinópolis e mapeamento da encaixante e rochas adjacentes. Trabalho de Graduação. I.G.C.-U.F.M.G. 99p (inédito)
- TRUEMAN, D.L. & CERNÝ, P. 1982. Exploration for rare-element granitic pegmatites. In: Cerný (ed.). Granitic pegmatites in science and industry. Miner. Ass. Can. Short Course Handbook, 8: 463-493.
- VARLAMOFF, N. 1954a. Tendances actuelles dans l'étude des pegmatites à travers le monde; revue des travaux sur les pegmatites du congo Belge et du Ruanda-Urundi. Annales de la Société Géologique de Belgique, vol.77, 245-267.
- VARLAMOFF, N. 1954b. Répartition des types de pegmatites autour de la partie nord-ouest du grand massif granitique de Nyanza (Ruanda, Afrique). Annales de la Société Géologique de Belgique, v.78, p. 1-21.
- VARLAMOFF, N. 1959. Zonéographi de quelques champs pegmatitiques de l'Afrique Centrale et les classifications de K.A. Vlassov et de A.I. Guinsbourg. Annales de la Société. Géologique de Belgique, v.82, p.55-87.
- VARLAMOFF, N. 1961. Relations spatiales entre les granites et les pegmatites en Afrique centrale. Annales de la Société Géologique de Belgique, v.84, p. 153-162.

- VARLAMOFF, N. 1978. Classification and spatio-temporal distribution of tin and associated mineral deposits. *Jornal de Mineralogia, Recife-Brasil*. Vol.7 (Djalma Guimarães) 155-168.
- VIEIRA, V.S. 1985. Guanhães Folha SE. 23-Z-B. In: Projeto mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais; carta metalogenética, carta de previsão de recursos minerais; carta para planejamento de ações governamentais. Escala 1:250.000, Brasília, DNPM., 3 mapas, 26 p.
- VLASSOV, K.A. 1952. Textural-paragenetic classification of granitic pegmatites. *Izvestiya. Academy of Science U.R.S.S., ser.geol.*, 30-44 em russo. In: Varlamoff (1959).
- WALKER, R.J.; HANSON, G.N.; PAPIKE, J.J.; O'NEIL, R.J.; LAUL, J.C. 1986. Internal evolution of the Tin Mountain pegmatite, Black Hills, South Dakota. *American Mineralogist* 71: 440-459.
- WEGNER, R. 1983. Spurenelemente in Graniten Pegmatiten in Bundesstaat Minas Gerais, Brasilien, unter besonderer Berücksichtigung der feldspate, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Geowissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. 154p. Inédito.
- WHALEN, J.B., CURRIE, K., & CHAPPEL, B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 407-419.
- YODER, H.S., STEWART, D.B., SMITH, J.V. 1957. Ternary feldspars. *Carnegie Institute. Washington, Year Book* 56, p. 207-214.