



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



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

**MINERALOGIA, CAUSAS DE COR E GÊNESE DA TITANITA DO
MUNICÍPIO DE CAPELINHA (MINAS GERAIS)**

Eder Luiz Tolentino Junior

Orientador: Prof. Mario Luiz de Sá C. Chaves

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

Belo Horizonte, fevereiro de 2017

Nº 170

MINERALOGIA, CAUSAS DE COR E GÊNESE DA TITANITA DO MUNICÍPIO DE CAPELINHA (MINAS GERAIS)

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

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Autor: Eder Luiz Tolentino Junior

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

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

Belo Horizonte

2017

T649m Tolentino Junior, Eder Luiz.
2017 Mineralogia, causas de cor e gênese da titanita do município de Capelinha (Minas Gerais) [manuscrito] / Eder Luiz Tolentino Junior. – 2017.

90 f., enc. (principalmente color.)

Orientador: Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves.

Coorientador: Klaus Wilhelm Heinrich Krambrock.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2017.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 57-60.

Inclui anexos.

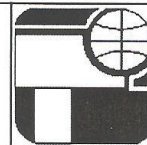
1. Mineralogia – Capelinha (MG) – Teses. 2. Jazidas – Capelinha (MG) – Teses. 3. Cor – Teses. I. Chaves, Mario Luiz de Sá Carneiro. II. Krambrock, Klaus Wilhelm Heinrich. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 549(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

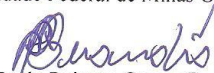
MINERALOGIA, TIPOLOGIA E CAUSAS DE COR DA TITANITA DO MUNICÍPIO DE CAPELINHA (MINAS GERAIS)

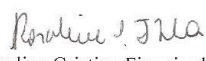
EDER LUIZ TOLENTINO JUNIOR

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 03 de fevereiro de 2017, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Paulo Roberto Gomes Brandao
Universidade Federal de Minas Gerais


Prof(a). Rosaline Cristina Figueiredo e Silva
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 3 de fevereiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, me iluminar e me dar força e sabedoria para seguir sempre em frente.

Agradeço ao meu orientador Professor Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves, por acreditar no meu trabalho, pelo apoio desde o primeiro momento em que conversamos sobre o meu interesse em fazer mestrado, por me oferecer este tema que ele tanto queria estudar e pelas incontáveis correções que foram feitas nesta dissertação durante esses dois anos de mestrado.

Agradeço ao meu co-orientador Professor Klaus Wilhelm Heinrich Krambrock, pelas análises que realizamos nos laboratórios do ICEX, pela paciência em me ensinar a preparar as amostras para os testes de EPR e absorção óptica e pela grande ajuda na análise e discussão dos resultados.

Agradeço aos moradores da cidade de Capelinha, que foram sempre solícitos em nos ajudar a encontrar os garimpos do Campo do Boa e Fanadinho. Um agradecimento especial ao garimpeiro Seu Adão e ao Lafaiete, comerciante de minerais na cidade.

Agradeço aos Professores Paulo Viana e Rísia Magriotis (Departamento de Engenharia de Minas da UFMG) que me deram as cartas de apresentação para o processo de seleção do mestrado.

Agradeço ao Professor Paulo Roberto Gomes Brandão (Departamento de Engenharia de Minas da UFMG) e sua equipe, pelas análises de fluorescência de raios X e difração de raios X.

Agradeço ao Professor Luiz Oliveira de Faria e sua aluna Esther Machado, pela grande ajuda na realização das análises de absorção óptica feitas no CDTN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

Agradeço à Professora Rosaline Cristina Figueiredo e Silva (Departamento de Geologia da UFMG) e seus alunos Sylvio Gomes e Carolin Kresse, pela paciência e grande ajuda na realização das análises e discussão dos resultados de inclusões fluidas.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa no final deste mestrado.

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio nos momentos difíceis e paciência nos momentos em que eu precisei me ausentar para dar foco neste trabalho.

Um agradecimento especial ao meu amigo Leone Silva por estar sempre solícito a me ajudar e à minha amiga Coralie Heinis Dias que me auxiliou muito durante todo o período de realização deste mestrado.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	Localização e acesso	11
2.	OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO	14
2.1	Objetivos.....	14
2.2	Metodologia de trabalho	14
3.	O MUNICÍPIO DE CAPELINHA.....	20
3.1	Resumo Histórico	20
3.2	Dados do município	21
4.	O AMBIENTE GEOLÓGICO.....	22
4.1	Grupo Guanhães – Formação Serra Negra	24
4.2	Grupo Macaúbas – Formação Salinas	24
4.3	Grupo Macaúbas – Formação Capelinha.....	25
5.	TITANITA – CARACTERÍSTICAS GERAIS	26
5.1	Aspectos históricos	26
5.2	Mineralogia e cristalquímica.....	27
5.3	Gemologia.....	29
6.	DEPÓSITOS ESTUDADOS.....	30
6.1	Campo do Boa	30
6.2	Fanadinho.....	32
7.	CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS ENCAIXANTES	36
8.	ANÁLISES DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E DIFRAÇÃO DE RAIOS X	40
9.	ANÁLISES POR MICROSSONDA ELETRÔNICA	40
10.	ANÁLISES DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – ESTUDO DAS CAUSAS DE COR	41
11.	ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO ÓPTICA.....	47
12.	INCLUSÕES FLUIDAS	48
13.	DISCUSSÕES GERAIS.....	52
14.	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS	57

ANEXO I – Paper submetido à revista Geologia USP Série Científica (B2 CAPES).	61
ANEXO II – Resultados completos das análises por difração de raios X	80
ANEXO III – Resultados completos das análises por microsonda eletrônica.....	85

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras

Figura 1- Exemplares de amostras de coleção com titanita de Capelinha - MG.....	11
Figura 2 - Mapa de localização do município de Capelinha em relação a Belo Horizonte. Fonte: Google Maps, imagem Landsat (2016). “A” roteiro via Diamantina, “B” roteiro via Itabira.....	12
Figura 3 - Mapa de localização das Folhas Capelinha e Malacacheta. Modificado de Projeto Criação de Banco de Dados Geográficos para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais, CODEMIG (2012).	13
Figura 4 - Mapa geológico da região de Capelinha. Junção de parte das folhas Malacacheta (SE-23-X-D-VI) e Capelinha (SE-23-X-D-V). Fontes: Baars et al. (1996) e Guimarães & Grossi-Sad (1997).....	23
Figura 5 - Foto dos garimpos em atividade em Capelinha: (A) Fanadinho; (B) Campo do Boa.	25
Figura 6 - Amostra de titanita euédrica com sua geminação típica em forma de cunha. Exemplar de Capelinha-MG. Fonte: Wikimedia Commons, 2005.	26
Figura 7 – Cristalização no sistema monoclinico.....	27
Figura 8 - Exemplar de coleção de uma drusa de titanita bruta. Capelinha-MG.	29
Figura 9 - Titanitas mexicanas lapidadas. (Fonte: INTERNATIONAL GEM SOCIETY, 2014. Sphene Jewelry and Gemstone Information).....	29
Figura 10 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no depósito do Campo do Boa. “A” (primeiro túnel de garimpo visitado – apresentado pelo garimpeiro Alemão), “B” (segundo túnel de garimpo visitado – apresentado pelo garimpeiro João), “C” (Visão geral do Campo do Boa) e “D” (“bucha” de quartzo, onde a titanita aparece associada).	32
Figura 11 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em janeiro de 2015 no depósito do Fanadinho I. “A” (entrada do túnel de garimpo que fica dentro do sítio do Adão), “B” e “C” (veios de feldspato intemperizado – porção maciça branca na parede dos túneis de garimpo que é usada como guia para o encontro da mineralização de titanita) e “D” (albitas alteradas, descartadas no garimpo do Adão).	34
Figura 12 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no depósito do Fanadinho II. “A” (entrada do túnel de garimpo que fica na parte de fora do sítio do Adão), “B” (Adão mostrando fragmento de feldspato fortemente intemperizado), “C” (placa na entrada do sítio do Adão com permissão de lavra concedida pelo DNPM) e “D” (veio de feldspato intemperizado – porção branca na parede do túnel de garimpo que é usada como guia para mineralização de titanita).	35
Figura 13 - Fotomicrografias das rochas metabásicas “A” (epidoto-actinolita-quartzoxisto) e “B” (epidoto-quartzo-albita) do depósito do Fanadinho com ênfase nas assembleias mineralógicas presentes, onde A e B são fotomicrografias com os nicóis descruzados e A’ e B’ fotomicrografias com nicóis cruzados.	36
Figura 14 - Fotomicrografias das rochas metabásicas “C” (epidosito) e “D” (quartzo-albita-epidosito) do depósito do Campo do Boa com ênfase nas assembleias mineralógicas presentes. Sendo C e D fotomicrografias com nicóis descruzados e C’ e D’ fotomicrografias com nicóis cruzados.	37
Figura 15 - Classificação das rochas metabásicas da região enfocada, baseado no diagrama de Winchester e Floyd (1977) para rochas vulcânicas utilizando elementos imóveis.	39
Figura 16 - Espectro de EPR mostrando a presença de Fe ³⁺ e VO ₂ ⁺ para o campo magnético alinhada nos três eixos principais de cristal de titanita de Xambioá.	42

Figura 17 - À esquerda, espectros de EPR mostrando dependência angular em amostras de titanita de Xambioá nos planos cristalográficos aba, c*bc* e ac*ca. À direita, representação do ajuste das dependências angulares através de parâmetros de spin Hamiltonian.	44
Figura 18 - Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de titanita gemológica da região do Bananal, natural (linha preta) e irradiado a 200 kGy (linha vermelha).	45
Figura 19 - Espectro de EPR em amostra de titanita do Bananal mostrando três diferentes estados de oxidação: natural (linha preta), reduzida (linha vermelha) e oxidada (linha azul).	46
Figura 20 - Espectros de absorção óptica de amostras de titanita do Brasil medidas à temperatura ambiente.	47
Figura 21 - Fotomicrografias de inclusões fluidas aquosas em cristais de quartzo associado à titanita, da região do Campo do Boa (Capelinha).	49
Figura 22 - Gráfico de isócoras gerado pelo programa Macflincor para fluidos com salinidade de 1%.	50

Quadros

Quadro 1 - Depósitos alvos deste projeto e as coordenadas em que se localizam.	13
---	----

Tabelas

Tabela 1 - Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos maiores nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG; todo Fe como Fe ³⁺).	39
Tabela 2 - Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos menores e traços nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG).	39
Tabela 3 - Resultados de fluorescência de raios X e difração de raios X para as amostras de rochas dos depósitos do Fanadinho e Campo do Boa.	40
Tabela 4 - Concentração de óxidos maiores nas amostras dos depósitos de Capelinha e outros depósitos mundiais para serem usados como parâmetros de comparação, obtidos por microsonda eletrônica. N.A. (não analisado); TR (terras raras); TIF (titanita do Fanadinho); TIC (titanita do Campo do Boa); TIR (titanita da Rússia), TIS (titanita da Suíça) e TIE (titanita da Etiópia), conforme Deer et al. (1992). Dados de % em peso; todo ferro como Fe ²⁺	41
Tabela 5 - Resultados das análises de microtermometria em amostra de quartzo associado à titanita.	49
Tabela 6 - Resultados de temperaturas de aprisionamento, em °C, relacionando cada grupo de inclusões analisado a um valor de pressão estimada.	51

RESUMO - A titanita é um mineral gemológico muito apreciado em todo o mundo, principalmente nas suas variedades verde, amarelo esverdeado e alaranjado. No Brasil, seus principais depósitos estão no norte de Minas Gerais (MG), ainda pouco conhecidos em termos geológicos e mineralógicos, e em geral considerados como parte integrante da Província Pegmatítica Oriental do Brasil. O propósito deste trabalho foi estudar os principais depósitos situados nos arredores da cidade de Capelinha (MG), conhecidos como Campo do Boa e Fanadinho, a fim de melhor conhecer seus aspectos geológicos, mineralógicos, químicos e ainda as causas de cor da titanita. Tais depósitos estão hospedados em um xisto metavulcânico básico, composto principalmente por albita, epidoto, actinolita, titanita e quartzo, relacionado à Formação Capelinha, do Grupo Macaúbas, de idade toniana. Os veios têm espessuras que variam de alguns centímetros até 4 m; eles são formados basicamente de feldspatos (albita e adulária), às vezes caulinizados, onde drusas de titanita e epidoto estão localmente presentes. Outros minerais importantes nesses veios, embora incomuns, são apatita, ilmenita e actinolita. Foram coletadas amostras de titanita e de outros minerais associados, como quartzo e feldspatos, para serem analisados por microsonda eletrônica (ME), difração de raios X, fluorescência de raios X, ressonância paramagnética eletrônica (EPR), absorção óptica e inclusões fluidas. As análises por ME indicaram a presença significativa de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e H_2O , provavelmente substitucionais. Tais resultados foram usados para comparar as titanitas de Capelinha com amostras de outros depósitos brasileiros e mundiais e serviram também de base para as análises de EPR e de absorção óptica. Por meio dessas análises, foi comprovada a presença de ferro na titanita e constatado que o íon Fe^{3+} é o causador da cor verde amarelada do mineral. Os resultados de difração e fluorescência de raios X comprovaram a predominância de albita, epidoto, adularia e quartzo nos depósitos, incluindo a presença quase constante de titânio nos mesmos. Finalmente, por meio das análises de inclusões fluidas, conseguiu-se relacionar a temperatura de aprisionamento dos fluidos hidrotermais, entre 300 - 400°C, com os estudos petrográficos a respeito das condições metamórficas vigentes na região de Capelinha. De tal maneira, acredita-se que a formação dessas inclusões seja de idade semelhante ao processo metamórfico submetido às rochas regionais, de fácies anfibolito e ocorrido em ± 570 Ma, provavelmente derivado de hidrotermalismo no final desse processo. Os depósitos de titanita e epidoto, essencialmente associados com a alteração das rochas básicas encaixantes, não possuem, portanto, qualquer relação com os depósitos ácidos pegmatíticos mais novos (510-480 Ma) incluídos na Província Pegmatítica Oriental.

Palavras-chave: Titanita; Mineralogia; Capelinha; Fanadinho; Campo do Boa.

ABSTRACT – Titanite is a mineral much appreciated worldwide, especially the colors: green, yellow-green and orange. In Brazil, its main deposits are in the northern Minas Gerais (MG), still little is known in geological and mineralogical terms, and generally considered as an integral part of the Eastern Brazilian Pegmatite Province. The purpose of this work was to study the main deposits located in the surroundings of the city of Capelinha (MG), known as Campo do Boa and Fanadinho, in order to better understand its geological, mineralogical, chemical and also the color causes of titanite. These deposits are hosted in a basic metavulcanic shale, mainly composed of albite, epidote, actinolite, titanite and quartz, related to the Capelinha Formation, of the Macaúbas Group, of Tonic age. The veins have thicknesses ranging from a few centimeters up to 4 m; they are formed primarily of feldspars (albite and adularia), sometimes kaolinized, where druses of titanite and epidote are locally present. Other important minerals in these veins, though uncommon, are apatite, ilmenite and actinolite. Samples of titanite and other associated minerals, such as quartz and feldspars, were collected to be analyzed by electron microprobe (EM), X-ray diffraction, X-ray fluorescence, electron paramagnetic resonance (EPR), optical absorption and fluid inclusions. The analysis by EM indicated a significant presence of Al_2O_3 , Fe_2O_3 and H_2O , probably substitutional. These results were used to compare Capelinha titanites with samples from other Brazilian and world deposits and also served as a basis for EPR and optical absorption analysis. Through these analyses, the presence of iron in the titanite was proven and it was verified that the ion Fe^{3+} is the cause of the yellow-green color in the mineral. The results of X-ray diffraction and fluorescence confirmed the predominance of albite, epidote, adularia and quartz in the deposits, including the almost constant presence of titanium in them. Finally, through the analysis of fluid inclusions, it was possible to relate the hydrothermal fluid trapping temperature, between 300 and 400 ° C, with the petrographic studies of the metamorphic conditions in the Capelinha region. Thus, it is believed that the formation of these inclusions is of similar age to the metamorphic process submitted to the regional rocks of amphibolite facies and occurred in ± 570 Ma, probably derived from hydrothermalism at the end of this process. The deposits of titanite and epidote, essentially associated with the alteration of the basic rocks, do not have any relation with the newer pegmatitic acid deposits (510-480 Ma) included in the Eastern Brazilian Pegmatite Province.

Keywords: Titanite; Mineralogy; Capelinha; Fanadinho; Campo do Boa.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é mundialmente conhecido por sua riqueza em minerais gemológicos. Das nove províncias gemológicas existentes no mundo, ou seja, das nove regiões geográficas excepcionalmente ricas em gemas, a produção brasileira ocupa a liderança tanto na quantidade quanto na diversidade de pedras preciosas.

Segundo o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM), até o ano de 2013, o Brasil era responsável por aproximadamente 1/3 do volume de gemas, sendo o Estado de Minas Gerais o maior produtor nacional. Para demonstrar a diversidade, o DNPM relaciona 108 gemas diferentes, incluindo gemas que podem não estar sendo produzidas atualmente, mas que existem em volume considerável em pelo menos um lugar do país, como é o caso do rubi.

Boa parte da extração das gemas brasileiras é feita por garimpeiros e pequenas empresas de mineração, localizadas em sua maior parte nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará e Tocantins. De acordo com dados do IBGM, cerca de 80% das gemas brasileiras têm como destino a exportação e os outros 20% são destinados ao mercado interno, mais especificamente às indústrias joalheiras.

O parque industrial brasileiro voltado ao mercado de joias é bem diversificado. O IBGM estima que existam aproximadamente 3.500 empresas incluindo as de lapidação, de joalheria, de folheados e de bijuterias. A maioria dessas empresas está localizada em São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Bahia. O Brasil continua sendo o principal país produtor e exportador, mas vem diminuindo sua participação no cenário mundial devido ao crescimento da África do Sul nesse setor, além da entrada da China no mercado de joias.

Apesar de ocupar uma posição de destaque na produção de gemas, os depósitos de minerais gemológicos brasileiros ainda precisam ser muito estudados.

Algumas dezenas de veios e bolsões de quartzo com titanita, cortando rochas xistosas pré-cambrianas, são conhecidas a noroeste da cidade de Capelinha desde o final da década de 1960 (Cassedanne & Cassedanne 1971). Tais depósitos forneceram drusas e amostras de cristais para coleção de alta qualidade, como pode ser visto na Figura 1, além de abundante

material com aproveitamento gemológico, durante pelo menos 10 anos até aparentemente serem exauridos, quando na década de 1980 o intenso reflorestamento com eucalipto apagou nesta área todos os antigos vestígios da atividade mineradora. No final dos anos 1990, novos interessantes depósitos foram descobertos a nordeste da mesma cidade. Esses depósitos, ainda em plena produção, mostraram-se muito mais ricos e variados mineralogicamente do que os primeiros, tendo já fornecido vasto material para amostras de coleção, principalmente em agregados com feldspato e/ou epidoto.

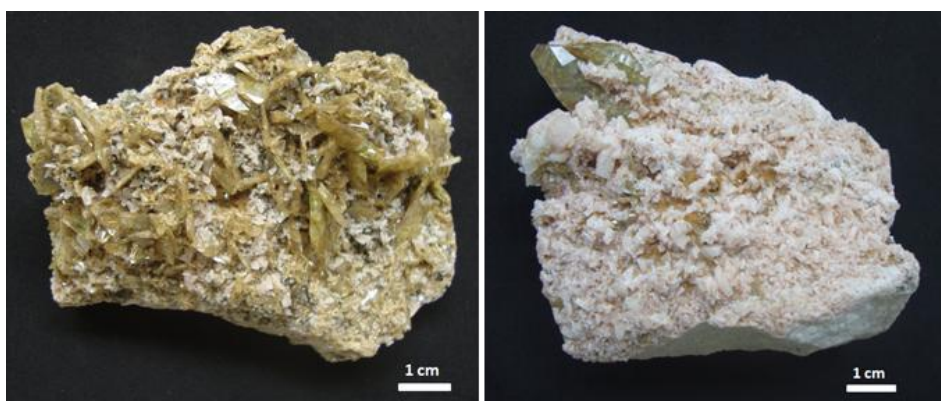


Figura 1- Exemplares de amostras de coleção com titanita de Capelinha - MG.

O presente trabalho visa apresentar dados quanto à geologia e a mineralogia de ambas as áreas mineralizadas, além de estudar as causas de variação de cores deste mineral gemológico tão raro e muito apreciado em todo o mundo. Ampliando-se os conhecimentos acerca da formação dessas jazidas, acredita-se que será mais fácil localizar outros depósitos de titanita em trabalhos futuros.

1.1 Localização e acesso

Os depósitos de titanita do Campo do Boa e Fanadinho localizam-se no município de Capelinha, na região nordeste de Minas Gerais, no vale do Jequitinhonha, na borda leste da Serra do Espinhaço, com sede nas coordenadas geográficas 17° 41' 29" de latitude sul e 42° 30' 58" de longitude oeste (Cidade Brasil, 2012).

Os principais acessos rodoviários para a cidade de Capelinha, a partir de Belo Horizonte, são:

- i) BR-135 / BR-040 (Belo Horizonte – Curvelo), BR-259 (Curvelo – Gouveia), BR-367 (Gouveia – Diamantina – Turmalina) e MG-135 (Turmalina – Capelinha);
- ii) BR-381 (Belo Horizonte – Bom Jesus do Amparo), MG-434 (Bom Jesus do Amparo – Itabira), MG-129 (Itabira) e BR-120 (Itabira – Guanhões – Santa Maria do Suaçuí – Capelinha).

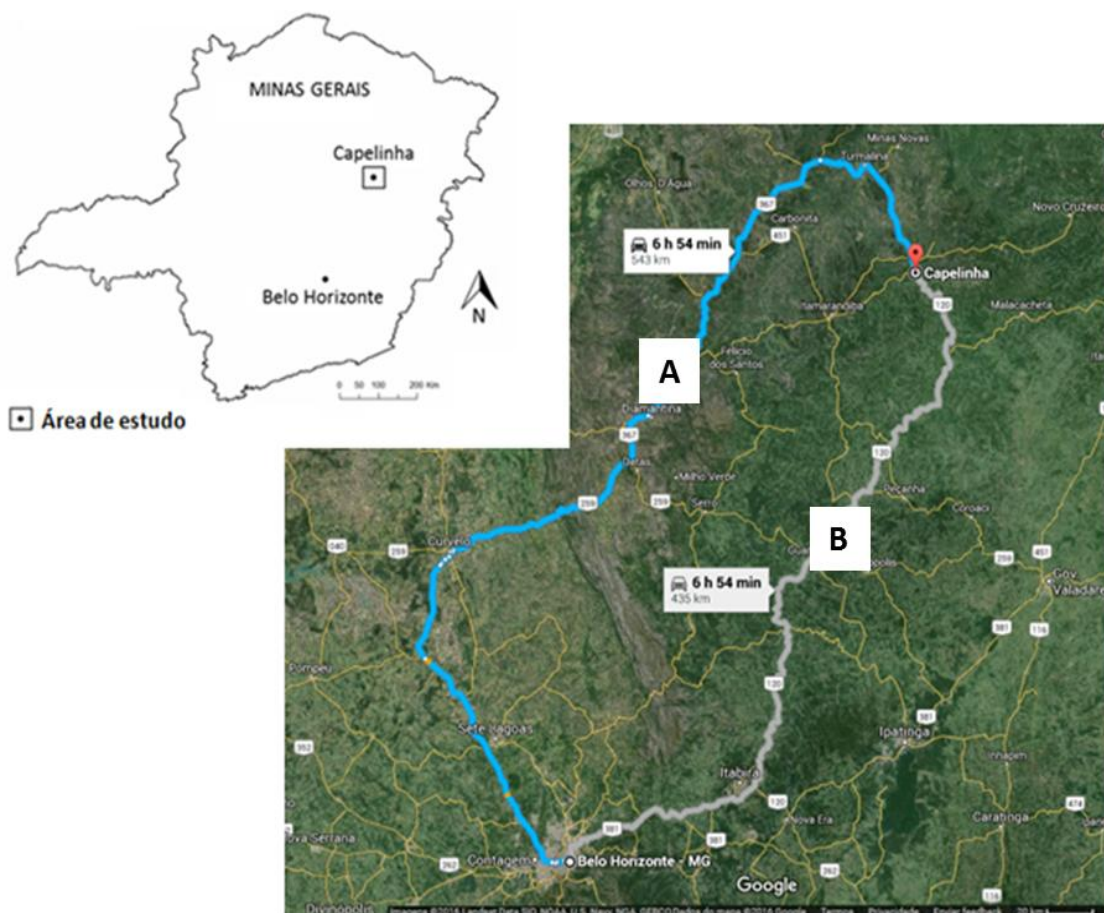


Figura 2 - Mapa de localização do município de Capelinha em relação a Belo Horizonte. Fonte: Google Maps, imagem Landsat (2016). “A” roteiro via Diamantina, “B” roteiro via Itabira.

Segundo dados do IBGE, sua área total ocupa 965.368 km² e está contida a nordeste da Folha Capelinha (CODEMIG 2012, SE-23-X-D-V, Mapa Geológico do Projeto Espinhaço, escala 1:100.000) e a noroeste da Folha Malacacheta (CODEMIG 2012, SE-23-X-D-VI, Mapa Geológico do Projeto Espinhaço, escala 1:100.000).

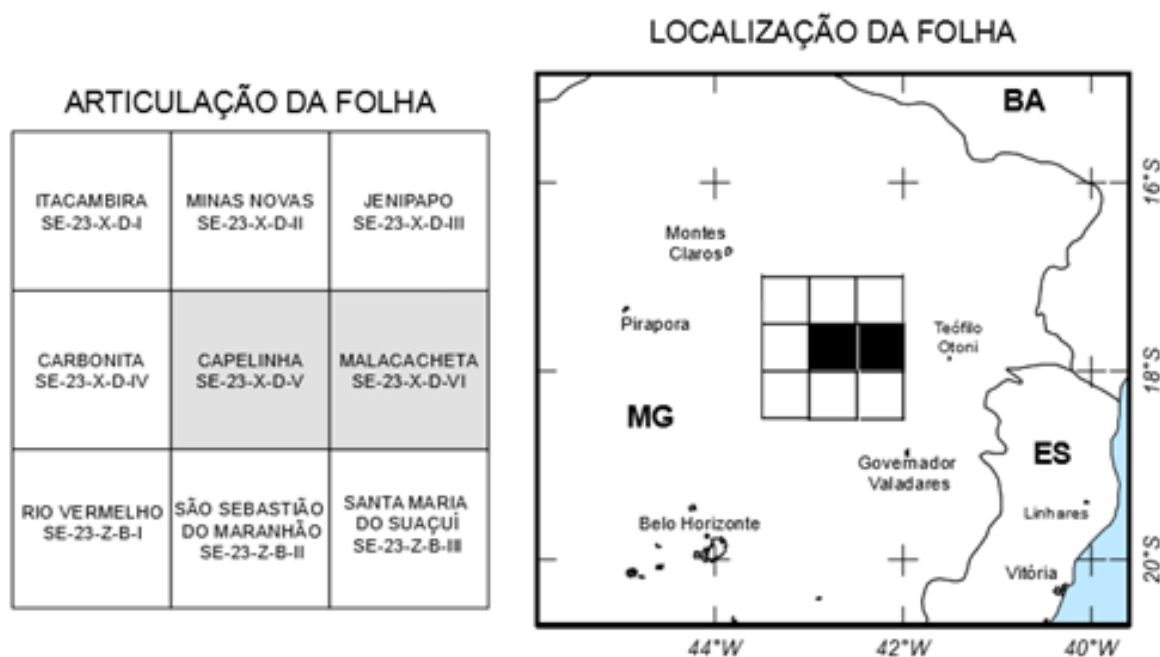


Figura 3 - Mapa de localização das Folhas Capelinha e Malacacheta. Modificado de Projeto Criação de Banco de Dados Geográficos para os Mapas Geológicos do Projeto Espinhaço, Minas Gerais, CODEMIG (2012).

Os depósitos de titanita estudados e suas respectivas coordenadas de localização encontram-se apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Depósitos alvos deste projeto e as coordenadas em que se localizam.

Depósito / Garimpo	Município	Coordenada (UTM)
Fanadinho – Serviço do Adão	Capelinha	770920 E – 8048320 N
Campo do Boa – Garimpo Principal	Capelinha	749875 E – 8056440 N
Campo do Boa – Fazenda Angicos	Capelinha	750774 E – 8057047 N

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1 Objetivos

A partir de estudos sobre os processos de formação geológica da região de Capelinha, trabalhos de campo, coleta de amostras e realização de testes de laboratório, pretende-se aumentar o conhecimento sobre a titanita gemológica e sua evolução mineralógica ao longo desta região, através da caracterização química, estrutural e determinação de causas de variação de cor deste mineral.

2.2 Metodologia de trabalho

A metodologia aplicada para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa foi dividida em estudos de campo e estudos laboratoriais. Os primeiros envolveram amostragem e caracterização geológica e mineralógica das amostras coletadas. Os segundos consistiram do estudo mineralógico das titanitas, através de: descrições petrográficas da rocha encaixante, difração de raios X, fluorescência de raios X, análises com microsonda eletrônica, ressonância paramagnética eletrônica (EPR), espectroscopia de absorção ótica e inclusões fluidas, visando compreender os principais elementos presentes e causadores de cores.

Para a realização das descrições petrográficas da rocha encaixante foi utilizado o seguinte equipamento:

- Microscópio modelo Axioskop 40 do fabricante Zeiss. As fotos das lâminas delgadas foram tiradas por uma câmera digital acoplada no microscópio e a lente usada no microscópio foi de 2,5 e 10 vezes de aumento.

Os elementos presentes e a composição mineralógica das amostras foram determinados através da fluorescência de raios X e difração de raios X, respectivamente. Essas análises foram realizadas no Laboratório do DEMIN da Escola de Engenharia da UFMG. As interpretações qualitativas de espectro foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados do padrão do ICDD (International Center for Diffraction Data). Para a realização destas análises foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Difratorômetro de raios X (DRX) para amostras em pó PHILIPS (PANALYTICAL), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00;
- Espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) sequencial PHILIPS (PANALYTICAL) modelo PW-2400.

A microsonda eletrônica é uma técnica de análise não destrutiva, que revolucionou o conhecimento da composição química dos materiais nas últimas décadas. O equipamento permite a determinação da composição química de qualquer material em região selecionada com aproximadamente 10 μm de diâmetro, através da combinação de princípios do microscópio eletrônico e microscopia ótica (Gomes, 1984; Goldstein, 2003; Porphírio et al., 2010).

A microsonda eletrônica é composta por um sistema elétron-ótico (formação do feixe eletrônico), sistema ótico (visualização da amostra) e sistema ótico de raios X (conjunto de detecção e análise dos elementos). Também fazem parte do equipamento, os sistemas de vácuo, leitura e registro. A análise do material requer seções polidas ou lâminas delgadas polidas, sendo indispensável uma metalização com alumínio, carbono ou ouro, entre outros metais (Gomes, 1984).

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

A microsonda eletrônica é uma técnica muito eficiente para identificação e caracterização química dos minerais, fornecendo uma estreita correlação entre a composição e a morfologia. Também permite a determinação de fases coexistentes, lamelas de exsolução, inclusões, alterações e zonamentos. Além disso, tem sido utilizada com êxito em análises modais e em análises químicas de rochas (Gomes, 1984; Porphírio et al., 2010).

Para a realização destas análises foi utilizado o seguinte equipamento:

- Microsonda eletrônica no aparelho JEOL-JXA8900R, nos modos EDS (semiquantitativo) e WDS (quantitativo). As condições analíticas empregadas foram as seguintes: tensão de aceleração de 15 kV, corrente do feixe na amostra de $2,00 \times 10^{-8}$ A (20 nA) e diâmetro do feixe de 20 micrômetros.

A ressonância paramagnética eletrônica (EPR) é uma técnica muito usada em experimentos nas áreas de física da matéria condensada, química, biofísica e mineralogia, dentre outras áreas. Consiste na absorção ressonante de radiação eletromagnética na faixa de microondas, na presença de um campo magnético estático, por sistemas que apresentam um spin eletrônico efetivo não nulo, como nos íons de terras-raras e metais de transição, dos radicais livres em líquidos e sólidos, dos defeitos pontuais em sólidos (como centros de cor ou átomos intersticiais), além de todos os sistemas que contenham elétrons desemparelhados. Este método é um dos mais eficazes na identificação de defeitos paramagnéticos em sólidos, devido ao fato de que o espectro de EPR possui informações detalhadas sobre a estrutura eletrônica dos defeitos como sua simetria local, dada pelo arranjo dos átomos ou íons na vizinhança próxima, e a distribuição da densidade de spin (Spaeth, 1992).

As medidas de EPR foram realizadas no Laboratório de Ressonância Magnética do Departamento de Física, localizado no Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Para a realização destas análises foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Espectrômetro de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) da firma Magnettech, Alemanha. Banda X (frequência de micro-ondas 9,5 GHz), campo magnético entre 100 e 600 mT, modulação 100 kHz.
- Irradiação gama: LIG - CDTN, fonte raios gama ^{60}Co .
- Forno tubular com tubo de quartzo com atmosfera controlada - Lindberg (até 1200°C).

Do ponto de vista óptico, as cores nos minerais são causadas pela combinação dos comprimentos de onda refletidos ou transmitidos, que não foram absorvidos pelo material. Através da utilização do espectrômetro de absorção, é possível realizar medições do fenômeno denominado absorção seletiva, que consiste na absorção de determinados

comprimentos de onda do espectro óptico devido às transições eletrônicas internas de metais de transição, de transições de tipo transferência de carga entre metais ou entre metais e ligante, assim como transições internas de vacâncias aprisionadoras de elétrons. O espectro de absorção ou vales de transmissão são os resultados deste tipo de análise, sendo que a posição e intensidade destas bandas são determinadas pela natureza do centro de cor ou metal de transição, pela simetria e pela intensidade do campo cristalino (Burns, 1993).

As medidas de absorção óptica foram realizadas no CDTN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) em amostras com faces paralelas e dimensões de, aproximadamente, 3,0 x 3,0 x 1,0 mm, onde a faceta maior é paralela ao plano de clivagem do mineral.

Para a realização destas análises foi utilizado o seguinte equipamento:

- Espectrofotômetro UV-Visível Shimadzu UV-2401PC.

Do ponto de vista óptico, as cores nos minerais são causadas pela combinação dos comprimentos de onda refletidos ou transmitidos, que não foram absorvidos pelo material. Através da utilização do espectrômetro de absorção, é possível realizar medições do fenômeno denominado absorção seletiva, que consiste na absorção de determinados comprimentos de onda do espectro óptico devido às transições eletrônicas internas de metais de transição, de transições de tipo transferência de carga entre metais ou entre metais e ligante, assim como transições internas de vacâncias aprisionadoras de elétrons. O espectro de absorção ou vales de transmissão são os resultados deste tipo de análise, sendo que a posição e intensidade destas bandas são determinadas pela natureza do centro de cor ou metal de transição, pela simetria e pela intensidade do campo cristalino (Burns, 1993).

As medidas de absorção óptica foram realizadas no CDTN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) em amostras com faces paralelas e dimensões de, aproximadamente, 3,0 x 3,0 x 1,0 mm, onde a faceta maior é paralela ao plano de clivagem do mineral.

Para a realização destas análises foi utilizado o seguinte equipamento:

- Espectrofotômetro UV-Visível Shimadzu UV-2401PC.

Inclusões fluidas são porções de fluidos aprisionados nos minerais. A importância do estudo destas inclusões é que ele permite determinar várias condições físico-químicas

reinantes durante a cristalização ou recristalização do mineral que as contém ou, ainda, durante os eventos metamórficos posteriores à formação destes minerais. Desta forma, as condições limitantes para a formação de um depósito mineral, o jazimento de rochas magmáticas, a diagênese das rochas sedimentares, o metamorfismo das rochas metamórficas e metassomáticas podem ser estabelecidas (Fuzikawa, 1985).

As bolhas presentes nos fluidos da maioria das inclusões são resultado da contração diferencial do líquido e do mineral hospedeiro durante o resfriamento, a partir de uma temperatura mais elevada de aprisionamento até a temperatura ambiente de observação (Sorby, 1958).

As substâncias gasosas mais comuns presentes nas inclusões são H_2O (vapor), CO_2 , CO , CH_4 , N_2 , SO_2 , H_2S e H_2 . Nas fases líquidas há uma predominância absoluta de H_2O , mas a presença de CO_2 líquido não é incomum (Fuzikawa, 1985).

A grande maioria das inclusões fluidas que são estudadas está no intervalo de 1 – 20 μm . Minerais de granulação grossa que não sofreram ação de esforços tectônicos ou metamórficos podem conter inclusões que atinjam 50 μm . Nos minerais das rochas metamórficas, as dimensões raramente ultrapassam 10 μm . Neste caso, o tamanho das inclusões é inversamente proporcional ao grau de metamorfismo (Fuzikawa, 1985).

Durante o crescimento ou o fraturamento de um mineral, porções minúsculas do fluido no qual este processo esteja ocorrendo podem ficar aprisionadas, dando origem a inclusões fluidas. No caso do crescimento, o fluido fica retido nas irregularidades da superfície de crescimento do mineral. Por razões diversas, como presença de impurezas, suprimento irregular de nutriente, etc., a superfície de um cristal não cresce de modo uniforme. O fechamento posterior destas irregularidades irá reter uma porção do fluido no qual o cristal esteja crescendo. Inclusões formadas desta maneira ou por processos equivalentes, contemporâneos ao crescimento do mineral, são denominadas de inclusões primárias.

No caso do fraturamento, após o término da cristalização do mineral, em consequência de esforços diversos, o mineral pode sofrer fraturas por onde haja penetração de fluidos. A cicatrização posterior destas fraturas pode aprisionar os fluidos, dando origem a inclusões secundárias. Estas inclusões são facilmente reconhecíveis, por serem numerosas e apresentarem-se normalmente ao longo de um alinhamento ou mais frequentemente numa

distribuição planar. Enquanto as inclusões primárias permitem a obtenção de dados sobre os fluidos e as condições físico-químicas existentes durante a formação do mineral, as secundárias permitem obter os mesmos dados existentes durante os eventos posteriores (Fuzikawa, 1985).

Uma grande variedade de métodos tem sido usada no estudo das inclusões fluidas e visam à determinação de alguma das seguintes características das inclusões fluidas, tais como: composição dos fluidos e sólidos; densidade dos fluidos; pressão e temperatura de formação; e história da evolução dos fluidos.

Os métodos de estudo têm sido subdivididos em dois grandes grupos: não destrutivos e destrutivos (Roeder, 1967, 1972, 1979). Os principais métodos não destrutivos são microscopia petrográfica, microtermometria e espectrometria Raman; enquanto os destrutivos são microscopia eletrônica de varredura, platina de esmagamento e LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*).

No presente estudo, foi realizado o método de microtermometria em um veio de quartzo associado à titanita visando à determinação da composição e densidade dos fluidos, além de sua temperatura e pressão de formação.

Os estudos de microtermometria foram realizados no laboratório de metalogenia do IGC-UFMG. Durante o estudo foram conduzidos ensaios de resfriamento (-140°C) e de aquecimento ($\sim 450^{\circ}\text{C}$). A platina foi calibrada com inclusões sintéticas e CO_2 e H_2O fornecidas pela Linkam. A precisão das medidas é de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ para temperaturas negativas e de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para as temperaturas entre $0 - 450^{\circ}\text{C}$.

Para a realização das análises de inclusões fluidas foi utilizado o seguinte equipamento:

- Linkam THMSG600 com um controlador de temperatura TMS93 em platina automática.

3. O MUNICÍPIO DE CAPELINHA

3.1 Resumo Histórico

Segundo Machado (2016), a decadência da mineração em Minas Gerais, ao final do século XVIII, foi um dos fatores que desencadearam a expansão do povoamento do território mineiro. Assim, no limiar do século XIX, muitos eram os que vendiam parte de seus escravos na região de Minas Novas para se internarem pelas matas nas adjacências de Alto dos Bois e vales dos rios Doce e Mucuri, com o objetivo de aí se estabelecerem com fazendas de criação de gado e lavouras em geral.

Ainda segundo o mesmo autor, em 1801, Manuel Luiz Pego se instalou nas proximidades de um córrego localizado no atual município de Capelinha. As terras que pretendia ocupar, em uma grande extensão, faziam limites com outras terras ocupadas pelos temíveis índios Botocudos, amplamente espalhados pelo vale do rio Doce. Em 1808, estando no Brasil, D. João VI (rei de Portugal) instituiu uma lei declaratória de guerra ofensiva contra a nação dos índios Botocudos, com a finalidade de exterminá-los e explorar as riquezas existentes em suas terras. Para tanto o rei criou Divisões Militares em todo o vale do rio Doce e perseguiu cruelmente as tribos. Acuados, os índios debandaram-se em direção principalmente do Mucuri e Jequitinhonha. Nessa sua fuga, por onde passavam vingavam-se dos colonos, ora tirando-lhes a vida e a de seus familiares, ora incendiando roças e pastos. Manuel Luiz Pego, ao tomar conhecimento dessa debandada dos índios, retirou-se da fazenda há pouco estabelecida e, juntamente com os familiares e amigos, instalou-se às margens do córrego Areão, exatamente onde se encontra hoje a cidade de Capelinha.

Após a morte de Manuel Luiz Pego, provavelmente em 1812, seu filho Feliciano Luiz Pego recebeu por herança a fazenda do córrego Areão. Nesse mesmo ano, mandou construir uma humilde capela dedicada a Nossa Senhora da Graça. As pessoas da região começaram então a denominar esta fazenda como “Capelinha de Nossa Senhora da Graça” (Machado, 2016).

O município de Capelinha localiza-se na região nordeste de Minas, no Vale do Jequitinhonha, tendo como base econômica a agricultura e o comércio. Seu principal produto de exportação é o café. Capelinha polariza uma microrregião constituída pelos municípios de

Minas Novas, Leme do Prado, Berilo, Chapada do Norte, Francisco Badaró, Turmalina, Veredinha, Itamarandiba, Carbonita, Aricanduva, Água Boa, e Angelândia.

3.2 Dados do município

A população do município é de 34.803, sendo 71,12% residentes na área urbana e o restante na zona rural, dados do censo 2010 (IBGE, 2010).

O clima da região de Capelinha é tropical, com seis meses secos (de abril a setembro). A precipitação máxima ocorre durante os meses de novembro, dezembro e janeiro, e o período mais seco, entre junho e agosto. O índice pluviométrico médio anual é de 1300 mm. A temperatura média anual é de 25°C.

Possui um microclima mais frio em relação ao resto do Vale do Jequitinhonha. Seu ponto mais alto atinge os 1200 metros de altitude na Serra da Noruega e seu ponto mais baixo está a 712 m de altitude, fato que contribui para as constantes geadas e ainda dias muito frios no inverno.

O exuberante cerrado outrora existente foi substituído, nas chapadas, pelo reflorestamento com eucalipto. Porções restantes de vegetação nativa, que ocorrem nos vales e pequenas chapadas estão atualmente sofrendo devastação acelerada pelo trabalho dos carvoeiros. A fiscalização é pouco presente e muitas fazendas não preservam mata nativa nem nas nascentes d'água. Os pequenos corpos de cerrado ainda existentes nas encostas mostram vegetação típica, em estratos arbóreo, arbustivo e subarbustivo-herbáceo. Vastas áreas estão em permanente estado de desmatamento em função da produção de carvão vegetal e lenha, sendo meio de subsistência por parte significativa da população.

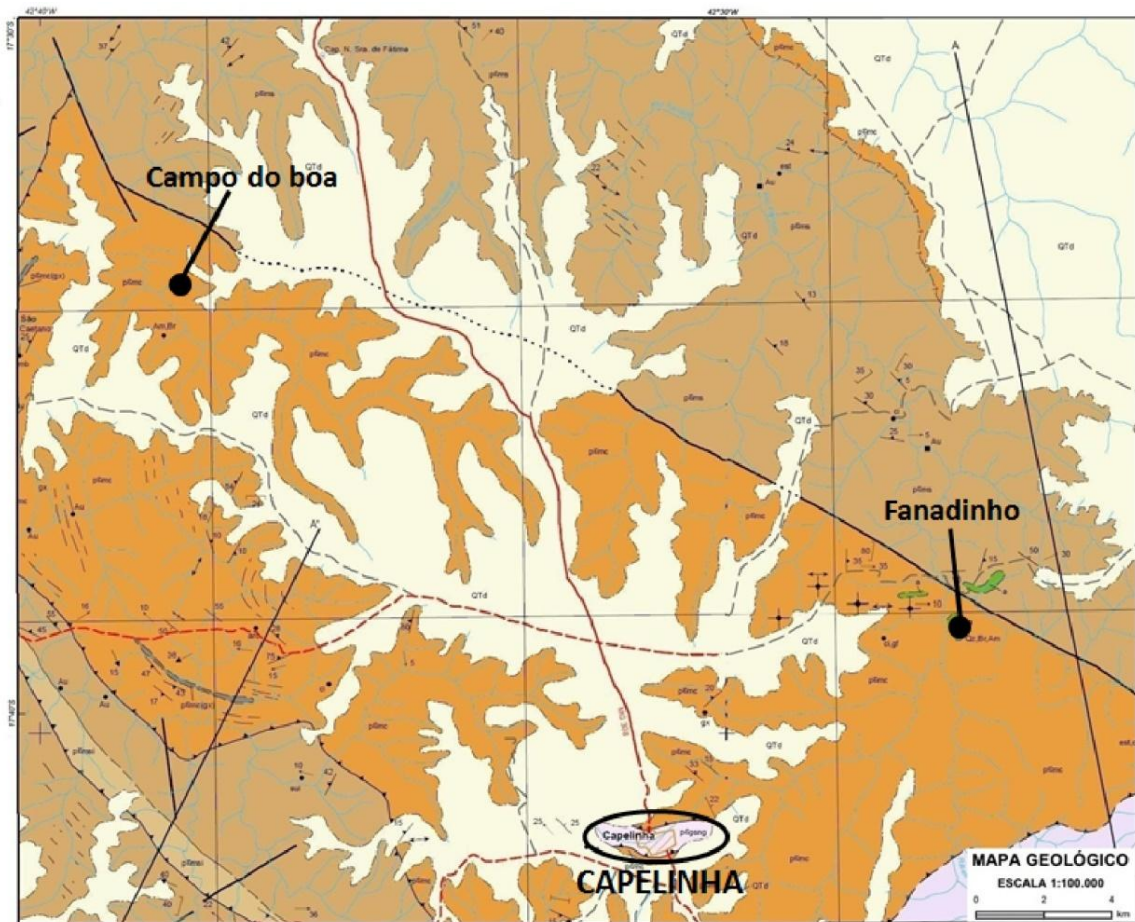
Os principais rios da região são o Itamarandiba e o Fanado.

4. O AMBIENTE GEOLÓGICO

Neste capítulo, será apresentada uma breve descrição do ambiente geológico da região de Capelinha.

A região de Capelinha pode ser considerada como ainda pobremente conhecida em termos geológicos. Mapeamento de cunho regional, na escala 1:250.000, deve-se a Fontes et al. (1978). Na década de 1990, o Projeto Espinhaço levantou grande parte da serra homônima em Minas Gerais (incluindo suas bordas) na escala de 1:100.000 (Figura 4), abrangendo as áreas onde se localizam as mineralizações de titanita no âmbito das folhas Capelinha e Malacacheta (Baars et al. 1997, Grossi-Sad & Guimarães 1997).

Neste projeto foram reconhecidas três unidades litoestratigráficas maiores, pré-cambrianas, designadas de Formação Serra Negra (Grupo Guanhães), Formação Salinas e Formação Capelinha (ambas do Grupo Macaúbas), recobertas por sedimentos detrítico-lateríticos cenozóicos. Recentemente, alguns trabalhos recentes de cunho mais detalhado voltados para a geologia regional foram realizados na área, citando-se Castro (2014) e Silva (2014).



LEGENDA
FANEROZÓICO
CENOZÓICO
QUATERNÁRIO / TERCIÁRIO

QTd Coberturas de solos elúvio-coluvionares laterizados, em superfícies de aplainamento, com níveis locais de talus nas encostas de chapadas.

ROCHAS SUPRACRUSTAIS
PROTEROZÓICO
NEOPROTEROZÓICO

GRUPO MACAÚBAS
FORMAÇÃO CAPELINHA

p_{mc} Quartzitos impuros intercalados com mica xistos transicionam para quartzitos puros em direção ao topo. Na transição aparecem níveis grafitosos (gx).

FORMAÇÃO SALINAS

p_{ms} Quartzito-mica xisto e mica xisto, localmente a granada, estauroilita e/ou cianita, bandados ou não, contendo intercalações espessas de camadas de grafita-cianita xisto do Membro Itacarambi (i), dominantes na base. Intercalações calciossilicáticas são comuns. As massas isoladas no embasamento contêm mica xistos, grafita-mica-quartzo xistos, quartzo-xistos ferruginosos, cianita-mica xisto e quartzo-moscovita-(cianita) xisto.

PALEOPROTEROZÓICO / ARQUEANO (?)

GRUPO GUANHÃES
FORMAÇÃO SERRA NEGRA

p_{gsg} Membro inferior (g), constituído por biotita gnaisses bandados e laminados, localmente milonitizados (milonito xistos) e migmatizados. Contém localmente intercalações calciossilicáticas, laminadas, e anfibolíticas, bandadas.

CONVENÇÕES GEOLÓGICAS

75 Direção e mergulho de foliação: em gnaisses, foliação gnáissica; em granitos, orientação de micas; em metasedimentos, xistosidade
 + Foliação horizontal
 64 Direção e mergulho de foliação milonítica
 = Direção de foliação milonítica vertical
 83 Direção e mergulho de clivagem rochosa
 - Direção de clivagem rochosa vertical

25 Rumo e caimento de lineação mineral
 15 Rumo e caimento de eixo de dobra aberta
 + Rumo de eixo horizontal de dobra aberta
 --- Contato inferido
 --- Limite de depósito detrito-coluvionar
 --- Contato conjectural

↔ Direção de lineação mineral horizontal
 ✕ Mina em atividade
 ■ Garimpo
 • Ocorrência
 — Falha indiscriminada e lineamentos estruturais
 — Falha de empurrão ou reversa inferida
 — Falha de empurrão ou reversa conjectural
 - - - Falha encoberta

Ale: Alexandrita; Am: ametista; am: água marinha; Au: ouro; Be: berílio; Br: brasilianita; ci: cianita; est: estauroilita; gf: grafita; gn: Gnaíse; Qz: Quartzo; sil: sillimanita

Figura 4 - Mapa geológico da região de Capelinha. Junção de parte das folhas Malacacheta (SE-23-X-D-VI) e Capelinha (SE-23-X-D-V). Fontes: Baars et al. (1996) e Guimarães & Grossi-Sad (1997).

4.1 Grupo Guanhães – Formação Serra Negra

Rochas pertencentes a esta unidade geológica ocorrem segundo uma faixa leste-oeste, ao sul de Capelinha, truncadas por extensos falhamentos onde sequências mais novas a estão cavalgando. Essas rochas representam o bordo extremo norte da Serra Negra, a qual foi considerada por Uhlein (1991) como constituída por faixas alternantes de rochas gnáissicas, do Complexo Basal (Arqueano), com rochas xistosas e quartzíticas, atribuídas ao Supergrupo Minas (Paleoproterozóico). O Projeto Espinhaço (Baars et al. 1997), entretanto, considerou ambas as sequências como partes de um mesmo conjunto estratigráfico, seguindo proposta de Pedrosa-Soares et al. (1993).

4.2 Grupo Macaúbas – Formação Salinas

A Formação Salinas aflora em extensa região margeando internamente a zona alta constituída pelas “chapadas” terciárias, a oeste, norte e leste da cidade de Capelinha (Figura 4). Ao sul desta cidade tal formação ocorre empurrada sobre as rochas do Grupo Guanhães, sendo o contato com esta unidade definido por zonas cisalhadas. As rochas de tal formação equivalem, no mapa apresentado (Baars et al. 1997, Grossi-Sad & Guimarães 1997), àquelas designadas como “Unidade C” do Grupo Macaúbas por Hettich (1977) na região de Carbonita, a oeste, e por Uhlein & Chaves (1987) na região de São Gonçalo do Rio Preto, a sul.

Na base desta formação ocorrem mica-quartzo-cianita xistos, localmente grafitosos. Esses xistos são finos, embora a cianita forme agregados cristalinos com dimensões de até 1 m, compondo uma faixa mapeada por Baars et al. (1997) a oeste de Capelinha, onde foram designados de “Membro Itacarambi”. Afloramentos desta sequência possuem extensão de 20 km e larguras variáveis de até 1 km. As camadas individuais de xistos grafitosos têm espessuras de até 200 m, constituindo a base de ciclos composicionais que gradam para unidades formadas por muscovita e caulinita, as quais, por sua vez, gradam a composições mais quartzosas, melhor preservadas. Os mesmos autores consideram como protólitos de tais rochas, folhelhos negros (*black shales*).

4.3 Grupo Macaúbas – Formação Capelinha

Esta formação ocupa as porções de relevo mais baixo, ao norte e noroeste de Capelinha, em uma faixa de direção NW-SE desde a localidade de São Caetano, cavalcando as rochas da Formação Salinas (Figura 4). Nas duas áreas mais importantes de ocorrências de titanita – Campo do Boa e Fanadinho (Figura 5) – rochas pertencentes a esta unidade são as pretensas hospedeiras da mineralização, entretanto, em ambas as áreas encontram-se mal expostas. No Fanadinho, Grossi-Sad & Guimarães (1997) colocam tal mineralização associada a níveis anfibolíticos intercalados na unidade, os quais também afloram muito discretamente.

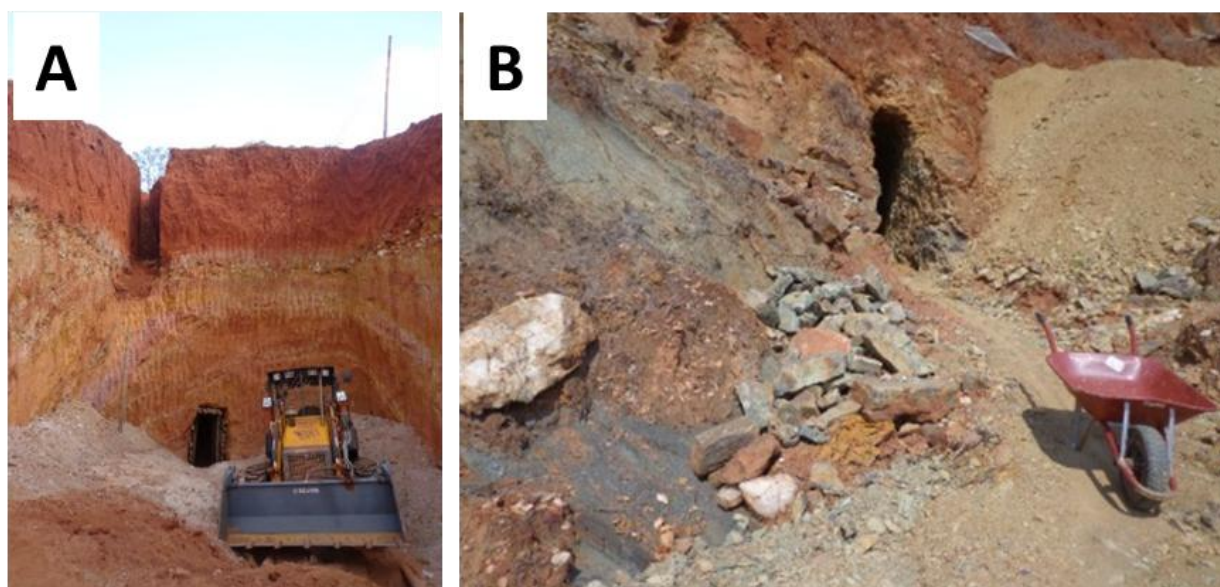


Figura 5 - Foto dos garimpos em atividade em Capelinha: (A) Fanadinho; (B) Campo do Boa.

A Formação Capelinha constitui-se em geral por alternâncias de quartzitos micáceos, xistos pelíticos com xistos grafitosos subordinados e quartzitos puros a ferruginosos. No topo, predominam os quartzitos puros. Este horizonte de topo seria separado do inferior por soleiras ou derrames de rochas básicas anfibolitizadas (Baars et al. 1997). Esses autores colocam o contato com a Formação Salinas com base no primeiro aparecimento de camadas de quartzito intercaladas com níveis xistosos, embora ressaltem que o mesmo encontra-se na base de terreno escarpado, recoberto por tálus com blocos de quartzito e quartzo de veio. Da mesma forma que na Formação Salinas, reconhecem dois membros, inferior e superior, não individualizados no mapa original.

5. TITANITA – CARACTERÍSTICAS GERAIS

Neste capítulo, serão apresentados, de maneira geral, os aspectos históricos, a mineralogia e a gemologia da titanita.

5.1 Aspectos históricos

A titanita é conhecida desde 1787 e foi nomeada em 1795 por Martin Klaproth em referência ao seu conteúdo de titânio. Em 1801, foi dado o nome de esfenio pelo mineralogista francês, Rene Just Haüy, devido à formação de seus cristais em forma de cunha (Figura 6) que em grego significa “sphenos”. Em 1982, o International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Minerals Names (IMA - CNMMN) decidiu adotar o nome titanita no lugar de esfeno, mas ambos os nomes continuam a ser usados no meio mineralógico, sendo o esfenio mais usado para designar a forma de gema deste mineral. (Fonte: Gemselect, acesso 04/05/2016).



Figura 6 - Amostra de titanita euédrica com sua geminação típica em forma de cunha. Exemplar de Capelinha-MG. Fonte: Wikimedia Commons, 2005.

A titanita é um mineral acessório que ocorre em granitos e rochas metamórficas como gnaisses e xistos. Como qualidade gema, está associada a pegmatitos. Atualmente, os principais países produtores de titanita são: Afeganistão, Austrália, Áustria, Birmânia (Myanmar), Brasil, Canadá, Estados Unidos, Índia, Madagascar, México, Quênia, Rússia, Sri Lanka (Ceilão) e Suíça.

5.2 Mineralogia e cristalquímica

A titanita é um mineral nesossilicato de titânio e cálcio, $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$. Sua composição química é idealmente distribuída em 28,6% de CaO , 40,8% de TiO_2 e 30,6% de SiO_2 . Pequenas quantidades de terras-raras, Fe, Al, Mn, Mg e Zr podem estar presentes. Sua estrutura consiste em octaedros de TiO_6 compartilhando arestas e formando cadeias enroladas paralelas ao eixo a . Estas cadeias são ligadas por tetraedros isolados de SiO_4 . Este arcabouço octaédrico-tetraédrico produz cavidades que alojam Ca em uma coordenação 7 (Dana, 1969; Klein & Dutrow, 2012).

A cristalização da titanita ocorre no sistema monoclinico $2/m$, representado na Figura 7, formando cristais em forma de cunha resultantes de uma combinação de $\{001\}$, $\{110\}$ e $\{111\}$. A clivagem é distinta no plano $\{110\}$ e partição em $\{100\}$ pode estar presente (Dana, 1969) e (Klein & Dutrow, 2012). Sua fratura é de conchoidal a fibrosa, de brilho adamantino a resinoso (IBGM, 2009).

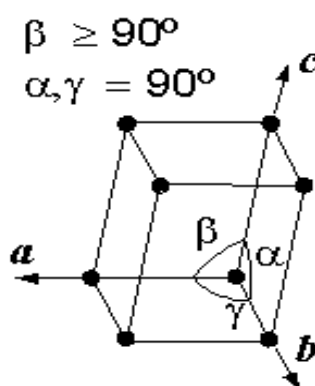


Figura 7 – Cristalização no sistema monoclinico.

Na titanita, um dos oxigênios que aparece na fórmula não é parte dos grupos Si-O-Si (tetraedros isolados), mas está ligado aos cátions entre os tetraedros. O Ti está ligado a seis oxigênios, nos vértices de um octaedro regular (Dana, 1969; Klein & Dutrow, 2012).

A titanita apresenta-se nas cores amarelo, verde, marrom, laranja e raramente vermelho. Além de cinza a preto (material sem qualidade gemológica). Possui índices de refração de 1,900 a 2,034 ($\pm 0,020$). Apresenta sinal óptico biaxial positivo, birrefringência entre 0,100 e

0,135 e dispersão de 0,051. Não apresenta fenômenos ópticos nem fluorescência. Os exemplares amarelos e marrons podem apresentar pleocroísmo de moderado a forte nas cores amarelo claro, laranja amarronzado e amarelo amarronzado. Algumas gemas possuem espectro de absorção que se apresentam como linha dupla em 580 nm (IBGM, 2009).

O peso específico da titanita varia entre 3,40 e 3,55 (Dana, 1969) e (Klein & Dutrow, 2012). Sua dureza está entre 5 e 5,5 na escala Mohs (Dana, 1969), (IBGM, 2009; Klein & Dutrow, 2012).

A titanita apresenta dureza inferior à da estauroлита, mas superior a da esfalerita (Dana, 1969) e (Klein & Dutrow, 2012). Também pode ser identificada pela forte duplicação de imagem, forte dispersão e geminação é muito comum (IBGM, 2009).

A titanita é um mineral muito sensível a mudanças de temperatura, mas estável à luz do dia. Apresenta reação química quando é atacado por ácidos (IBGM, 2009).

Pode ser confundida com zircão, esfalerita, scheelita, cassiterita, andradita, além dos materiais sintéticos rutilo, zircônia cúbica, *gadolinium gallium garnet* (GGG) e *yttrium aluminum garnet* (YAG) (IBGM, 2009).

Titanita em pequenos cristais é um mineral acessório comum em granitos, granodioritos, dioritos, sienitos, nefelinassienitos. É encontrada em grandes cristais em rochas metamórficas; anfíbolitos, cloritaxistos e mármore. Também encontrada com minérios de ferro, piroxênio, anfíbólio, escapolita, zircão, apatita, feldspato e quartzo (Dana, 1969; Klein & Dutrow, 2012).

A mais notável ocorrência de titanita está na península de Kola, Rússia, onde é associada com apatita em um sienito nefelínico. É minerada como uma fonte de titânio. É encontrada em cristais em Tavetsch, Binnental e St. Gotthard, Itália; região de Vohemar-Ambilobé, Madagascar; e Arendal, Noruega. Nos Estados Unidos, em Diana, Rossie, Fine, Pitcairn e Edenville, Nova York; e Riverside, Califórnia. Também em lugares diversos como Ontário e Quebec, Canadá (Dana, 1969; Klein & Dutrow, 2012).

O maior uso da titanita é como fonte de óxido de titânio para pigmento de tintas e em menor proporção como gema (Dana, 1969; Klein & Dutrow, 2012).

5.3 Gemologia

A titanita é caracterizada pelo seu brilho intenso e por seus cristais em forma de cunha, sendo utilizada como gema e peças de coleção. Pode ser encontrada em uma grande variedade de cores, mas as mais valorizadas são as titanitas verdes, amarelo esverdeadas e alaranjadas. Sua dispersão pode ser notada mesmo em estado bruto (Figura 8).



Figura 8 - Exemplar de coleção de uma drusa de titanita bruta. Capelinha-MG.

Excepcionalmente, ocorrem bem cristalizados e permitem a lapidação. A quantidade desses minerais é insuficiente à comercialização tradicional e por isso esta gema é considerada como um mineral de coleção. Seu valor depende da raridade, cristalização e beleza dos arranjos dos cristais.

Ao ser lapidada (Figura 9), seu jogo de cores torna-se ainda mais evidente, superando o de quase todas as gemas preciosas.



Figura 9 - Titanitas mexicanas lapidadas. (Fonte: INTERNATIONAL GEM SOCIETY, 2014. Sphene Jewelry and Gemstone Information).

Pode ser encontrada em vários locais em todo o mundo. A recente descoberta no Brasil e Madagascar tornou essa gema mais disponível do que nunca, embora ainda seja desconhecida pelo público em geral. Os depósitos de titanita no Brasil encontram-se no município de Capelinha, onde são extraídas gemas de alta qualidade.

Por apresentar uma dureza relativamente baixa e ser um mineral com tenacidade quebradiça, sua utilização como gema fica um pouco limitada a pingentes, colares e brincos, devendo-se evitar seu uso em anéis.

A limpeza deve ser feita à mão com água morna e sabão neutro, enxaguando-a bem e secando com pano macio. Evitar limpeza a vapor e outros produtos químicos, pois a titanita é sensível ao calor e pode reagir com alguns produtos ao longo do tempo, danificando a gema.

As joias com titanita devem ser armazenadas em um compartimento separado das demais, pois pode ser riscada pela maioria das gemas facetadas. Recomenda-se embrulhá-la em pano ou colocá-la dentro de uma caixa de joias forrada com tecido.

O preço por quilate aumenta muito quando se trata de titanita, pois a maioria dos cristais encontrados está abaixo de dois quilates.

6. DEPÓSITOS ESTUDADOS

Durante estes dois anos de estudos realizados na região de Capelinha, foram feitos dois trabalhos de campo. O primeiro ocorreu em janeiro de 2015, visitando a Fazenda Angicos e o garimpo que fica dentro do sítio do Adão (chamado pelos autores de Fanadinho I). O segundo ocorreu em outubro de 2015, visitando o garimpo do Campo do Boa e o garimpo que fica na parte de fora do sítio do Adão (chamado pelos autores de Fanadinho II).

6.1 Campo do Boa

Segundo Cassedanne & Cassedanne (1971) os depósitos da área do Campo do Boa (Figura 10) foram descobertos em 1966, ao acaso, quando se achou um veio contendo titanita muito bem cristalizada, inicialmente confundida com brazilianita. Na verdade, o Campo do Boa é uma área bastante extensa, com mais de 5 km alongada na direção W-E, onde ocorrem dezenas de veios mineralizados. A zona de garimpo principal, na atualidade, possui coordenadas UTM-GPS 749850-900E/8056430-450N, estando localizada entre as cotas 765-775 m.

Nessa região, ocorrem quartzitos finos a médios, de atitudes de acamamento em torno de N50-55°E/30-35°NW, que são capeados por rochas metavulcânicas básicas xistosas, que contem a mineralização. Muitas vezes a base das galerias é dada pelos quartzitos. Estas consistem em uma série de pequenas escavações longas e estreitas, muitas desabadas, além de poços inacessíveis, que exploram por garimpagem veios lenticulares de quartzo alinhados aproximadamente na direção N70°E, ou seja, subpararelos à foliação, encaixados nas rochas metabásicas com mergulhos baixos para norte. Tais veios possuem espessuras variáveis até cerca de 50 cm. Corpos lenticulares ou em forma de “buchos” também são frequentes.

Nos veios feldspáticos, a albita forma agregados bem cristalizados, decimétricos, muito apreciados como amostras de coleção. O quartzo, mais raro, é mal cristalizado, em geral hialino e de porte decimétrico, ocorrendo irregularmente disperso. Eles podem conter ainda cristais de epidoto, titanita e/ou turmalina, isolados ou em grupos, por vezes sobre uma base comum correspondendo a fragmentos de epidosito englobados no quartzo. As drusas de quartzo são atapetadas por epidoto e/ou titanita, e as cavidades, de dimensões decimétricas, são revestidas de cristais de albita, associados ou não a algum dos minerais precedentes.

A Figura 10 mostra fotos do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no garimpo do Campo do Boa. Durante este trabalho, foi possível entrar em alguns túneis de garimpo e conversar com alguns garimpeiros que estavam trabalhando no momento da visita. Também foram coletadas algumas amostras de titanita de qualidade não gemológica e feldspatos.

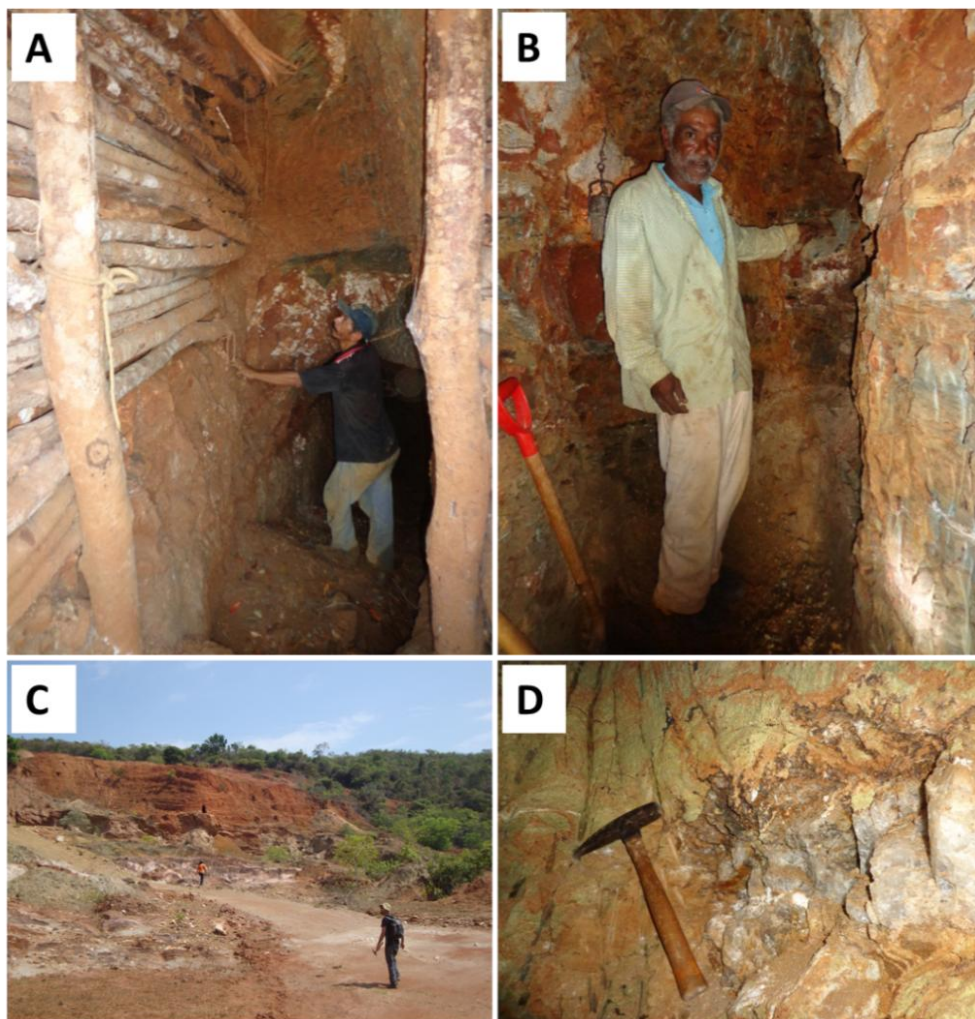


Figura 10 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no depósito do Campo do Boa. “A” (primeiro túnel de garimpo visitado – apresentado pelo garimpeiro Alemão), “B” (segundo túnel de garimpo visitado – apresentado pelo garimpeiro João), “C” (Visão geral do Campo do Boa) e “D” (“bucho” de quartzo, onde a titanita aparece associada).

6.2 Fanadinho

Os depósitos da área do Fanadinho são de descoberta mais recente (década de 1990) e apresentam certas diferenças mineralógicas em relação aos do Campo do Boa. O Serviço do Adão, em plena produção, corresponde atualmente a uma permissão de lavra garimpeira (PLG) do DNPM, de coordenadas GPS-UTM 770920E/8048320N, e cotas 710-730 m.

Nesse local, embora a expressão dos veios seja semelhante, entre alguns decímetros a alguns metros (um corpo irregular com pelo menos 4 m de espessura máxima, em lavra, foi verificado), ressaltam-se algumas particularidades. Tais veios encontram-se fortemente

caulinizados, e a existência de albita preservada é mais rara no corpo principal dos mesmos, com quartzo quase ausente. Nas cavidades mineralizadas em geral como “buchos”, eles se compõem por albita branca pouco desenvolvida associada à titanita e/ou ortoclásio róseo claro, em geral atapetados de cristais de epidoto e/ou titanita tardios. No Fanadinho o epidoto é muito mais abundante que no Campo do Boa, e drusas grandes de titanita, multicentimétricas, associadas ou não a epidoto, também foram observadas, algumas raras vezes com actinolita, ilmenita ou apatita associadas.

Os depósitos da área do Fanadinho exibem certas diferenças mineralógicas em relação aos do Campo do Boa. Embora a expressão dos veios seja semelhante, entre alguns decímetros a alguns metros (um corpo irregular com pelo menos 4 m de espessura máxima, em lavra, foi verificado), ressaltam-se algumas particularidades. Nesta localidade, tais veios encontram-se fortemente caolinizados, e a existência de albita é mais rara no corpo principal dos mesmos, com quartzo quase ausente. Nas cavidades mineralizadas em geral como “buchos”, eles se compõem por albita branca pouco desenvolvida associada à titanita e/ou ortoclásio adularia róseo claro, em geral atapetados de cristais de epidoto e/ou titanita tardios. Nessa área o epidoto é muito mais abundante que no Campo do Boa, e drusas grandes de titanita, multicentimétricas, associadas ou não a epidoto, também foram observadas, algumas raras vezes com actinolita, ilmenita ou apatita associadas.

A Figura 11 mostra fotos do trabalho de campo realizado em janeiro de 2015, em que foram coletadas algumas amostras de titanita não gemológica em rocha e alguns feldspatos para análise química.

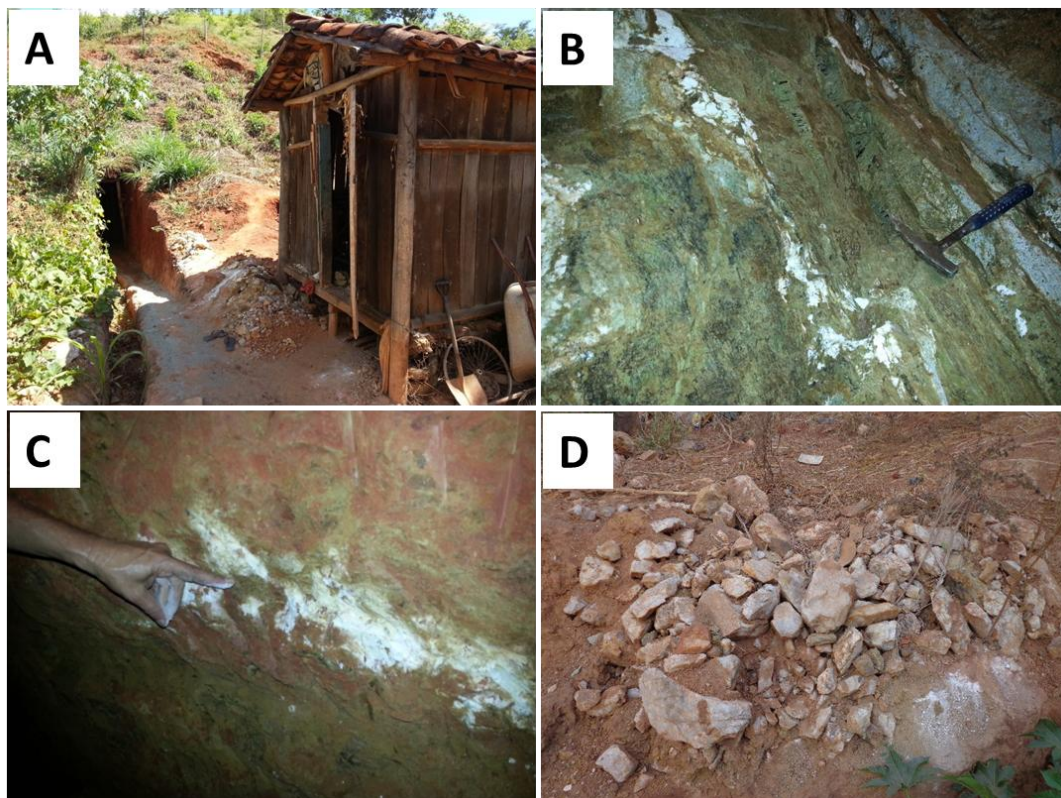


Figura 11 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em janeiro de 2015 no depósito do Fanadinho I. “A” (entrada do túnel de garimpo que fica dentro do sítio do Adão), “B” e “C” (veios de feldspato intemperizado – porção maciça branca na parede dos túneis de garimpo que é usada como guia para o encontro da mineralização de titanita) e “D” (albitas alteradas, descartadas no garimpo do Adão).

A Figura 12 mostra fotos do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no segundo túnel de garimpo do Adão (Fanadinho II). Este garimpo estava trabalhando com o auxílio de escavadeira e estava parado temporariamente devido ao risco de deslizamento de terra sobre a única entrada do túnel.



Figura 12 - Prancha apresentando fotografias do trabalho de campo realizado em outubro de 2015 no depósito do Fanadinho II. “A” (entrada do túnel de garimpo que fica na parte de fora do sítio do Adão), “B” (Adão mostrando fragmento de feldspato fortemente intemperizado), “C” (placa na entrada do sítio do Adão com permissão de lavra concedida pelo DNPM) e “D” (veio de feldspato intemperizado – porção branca na parede do túnel de garimpo que é usada como guia para mineralização de titanita).

7. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DAS ROCHAS ENCAIXANTES

Apresenta-se a descrição detalhada de quatro lâminas delgadas das rochas portadoras da mineralização de titanita, identificadas como amostras “A” até “D”, sendo “A” e “B” do depósito do Fanadinho e “C” e “D” do depósito do Campo do Boa (Figuras 13 e 14).

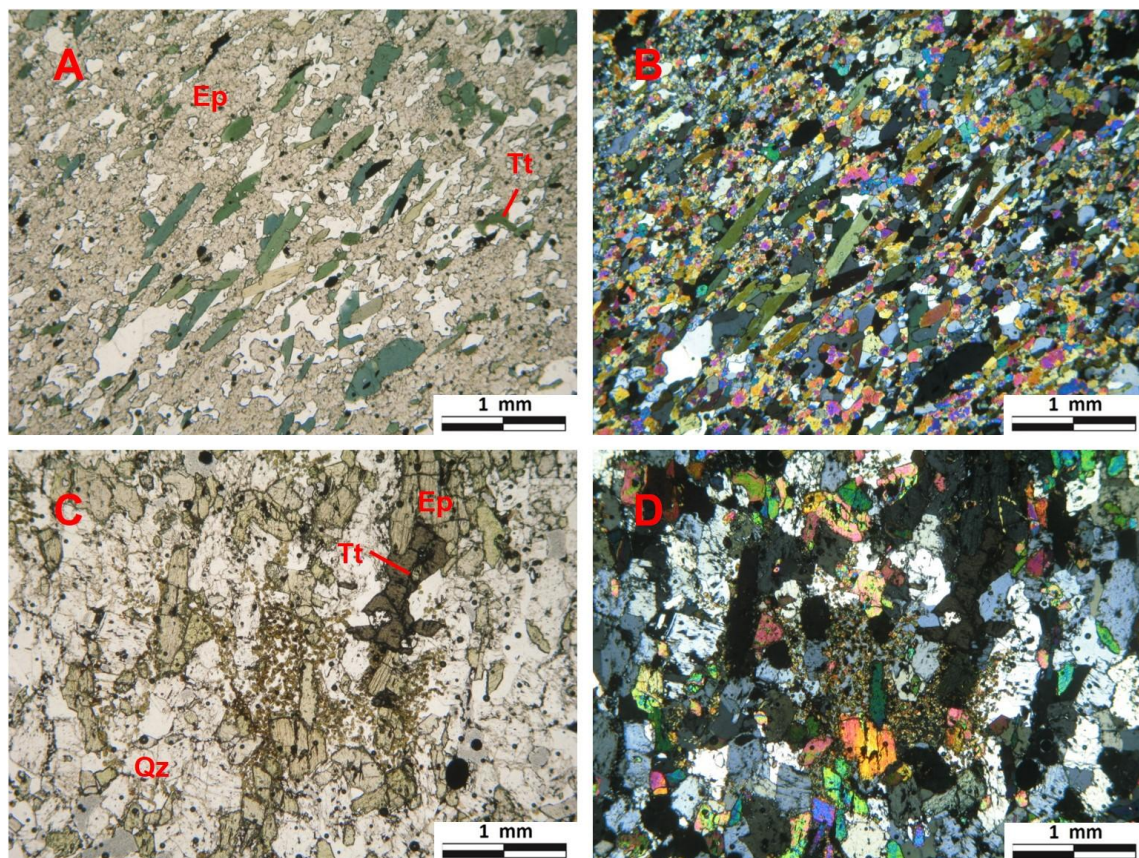


Figura 13 - Fotomicrografias das rochas metabásicas “A” (epidoto-actinolita-quartzoxisto) e “B” (epidoto-quartzo-albita) do depósito do Fanadinho com ênfase nas assembleias mineralógicas presentes, onde A e B são fotomicrografias com os nicóis descruzados e A’ e B’ fotomicrografias com nicóis cruzados.

A amostra “A” apresenta coloração acinzentada, com granulação fina e foliação suave. Vista ao microscópio (Figura 13), é possível identificar a textura porfiroblástica e lepidoblástica formada por uma matriz com minerais xenoblásticos inequigranulares. A maior parte desta rocha é composta por epidoto e prismas grossos de actinolita. Há ainda ocorrência de titanita, quartzo e minerais opacos com granulação fina. É possível notar a foliação através da orientação dos grãos dos minerais alongados. Ela foi classificada como um epidoto-actinolita-quartzoxisto.

A amostra “B” apresenta coloração esverdeada e grãos grossos de titanita e epidoto. Em termos microscópicos (Figura 13), é possível identificar uma textura granoblástica formada por minerais xenoblásticos inequigranulares. A maior parte da rocha é composta por quartzo, albita e epidoto de granulação grossa. Também há ocorrência de grãos grossos de titanita, além de minerais opacos e um mineral de granulação fina mostrado em destaque. Acredita-se que este mineral possa ser stilpnomelano, vermiculita ou brucita, mas para confirmação seria necessária análise com microsonda eletrônica. Esta é uma rocha básica que sofreu hidrotermalismo, alterando quase todo conjunto mineralógico para epidoto, além de um novo hidrotermalismo tardio, formando outros minerais; ela foi classificada como sendo um epidoto-quartzo-albita.

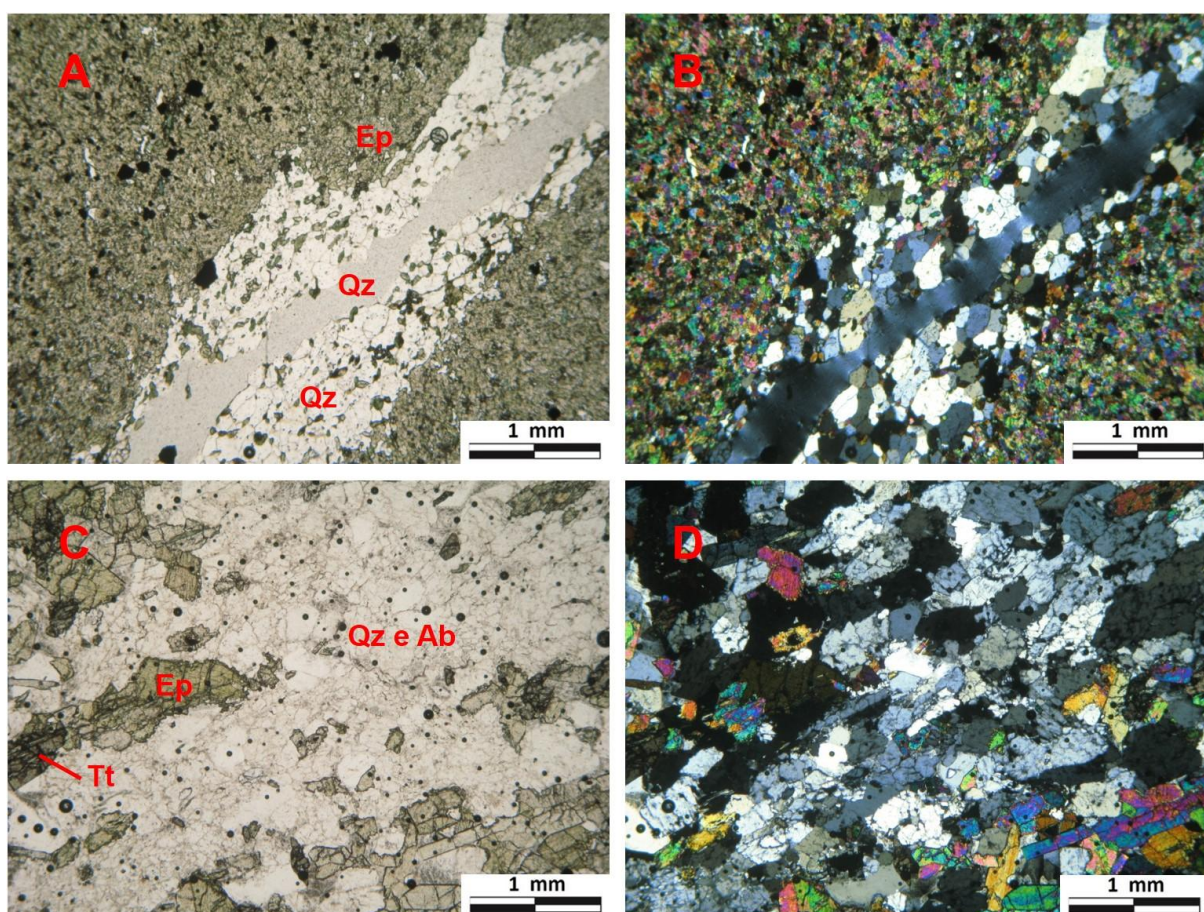


Figura 14 - Fotomicrografias das rochas metabásicas “C” (epidosito) e “D” (quartzo-albita-epidosito) do depósito do Campo do Boa com ênfase nas assembleias mineralógicas presentes. Sendo C e D fotomicrografias com nicóis descruzados e C’ e D’ fotomicrografias com nicóis cruzados.

A amostra “C” apresenta coloração cinza esverdeada e granulação muito fina. Com o auxílio do microscópio (Figura 14), é possível identificar uma textura granoblástica formada

por minerais xenoblásticos equigranulares. A maior parte desta rocha é composta por epidoto de granulação fina. Há ocorrência de minerais opacos, quartzo, titanita de granulação bem fina e actinolita, além de um microveio de quartzo ao longo da rocha onde é possível observar dois tipos de quartzo, um microcristalino ao centro e um quartzo recristalizado nas bordas. A rocha foi classificada como sendo um epidosito.

A amostra “D” apresenta coloração verde, com grãos finos de albita e grãos grossos de titanita e epidoto, sendo resultantes de uma cristalização secundária. Vista ao microscópio (Figura 14), é possível identificar uma textura granoblástica formada por minerais xenoblásticos inequigranulares. A maior parte da rocha é formada por quartzo e albita de granulação média, além de epidoto de granulação grossa. Também há ocorrência de titanita de granulação grossa. Na foto é ainda possível observar que o epidoto e a titanita são minerais de alto relevo, enquanto o quartzo e a albita são minerais de baixo relevo; eles só são possíveis de serem bem visualizados com nicóis do microscópio cruzados. Esta rocha foi classificada como um quartzo-albita epidosito.

Três amostras da rocha encaixante da mineralização foram submetidas a análises geoquímicas para cada um dos locais estudados, visando seus elementos maiores e menores/traços. Tais análises foram obtidas pelo método ICP-MS no laboratório da SGS-GEOSOL, em Vespasiano-MG (Tabelas 1 e 2). Estudo geoquímico anterior sobre a rocha em questão foi efetuado por Castro (2014), o qual, com base no diagrama clássico TAS (Total Alcalis versus Sílica) para elementos maiores, concluiu que os protólitos seriam basalto, andesito basáltico e picrobasalto (com base no diagrama de Le Maitre, 1989), indicando assim um ambiente vulcânico continental intraplaca para tal magmatismo.

Entretanto, tendo em vista que a rocha em questão apresenta metamorfismo, além de forte alteração hidrotermal (conforme observado na assembleia mineralógica observada na petrografia), processos que provavelmente modificaram sua composição original, preferiu-se utilizar o diagrama de Winchester e Floyd (1977), que utiliza elementos traços de baixa mobilidade geoquímica. Para estes autores, a abundância e a distribuição de alguns elementos menores ou traços podem ser utilizadas para a classificação de produtos da série magmática alcalina a subalcalina, de modo similar ao que é feito para os elementos maiores. De tal modo, a relação Zr/Ti seria equivalente ao comportamento da sílica, enquanto a relação Nb/Y corresponderia aos álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), possibilitando, por via indireta, a reconstrução do diagrama TAS (Figura 15). Segundo esse diagrama, todas as amostras analisadas foram

classificadas como álcali-basalto. Ressalta-se, ainda, que o magmatismo é substancialmente rico em titânio (1,30-2,19%).

Tabela 1 - Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos maiores nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG; todo Fe como Fe³⁺).

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF	Total
1-CB	51,00	1,30	14,15	11,30	0,17	6,10	12,45	1,50	0,29	0,15	1,23	99,64
2-CB	56,25	1,32	13,30	11,15	0,23	4,00	10,96	0,95	0,46	0,16	1,10	99,86
3-CB	47,78	1,57	15,06	11,64	0,17	8,48	10,15	2,41	0,29	0,18	1,95	99,68
4-FA	44,08	2,79	16,52	13,23	0,17	2,80	17,46	0,53	0,09	0,44	1,55	99,66
5-FA	50,13	2,88	13,87	14,66	0,20	4,83	8,29	2,66	0,16	0,36	1,70	99,74
6-FA	48,36	3,19	14,02	15,05	0,20	4,75	9,63	1,07	0,25	0,38	2,80	99,70
Média	49,60	2,17	14,49	12,84	0,19	5,16	11,49	1,52	0,25	0,28	1,72	99,71

Tabela 2 - Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos menores e traços nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG).

Amostra	F	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Ba	Zr	Nb	Sr
1-CB	380	440	155	59	77	67	88	11	129	89,4	8,7	289
2-CB	180	260	142	47	90	89	99	24	192	184,4	62,7	403
3-CB	590	292	101	72	110	56	47	24	66	167,3	22,5	888
4-FA	300	284	183	45	76	83	92	24	200	184,4	22,7	385
5-FA	363	350	142	61	72	44	74	20	79	153,1	18,3	545
6-FA	325	336	151	51	94	66	69	29	97	219,8	29,2	701
Média	356	327	146	56	88	68	78	22	128	166,4	27,4	535

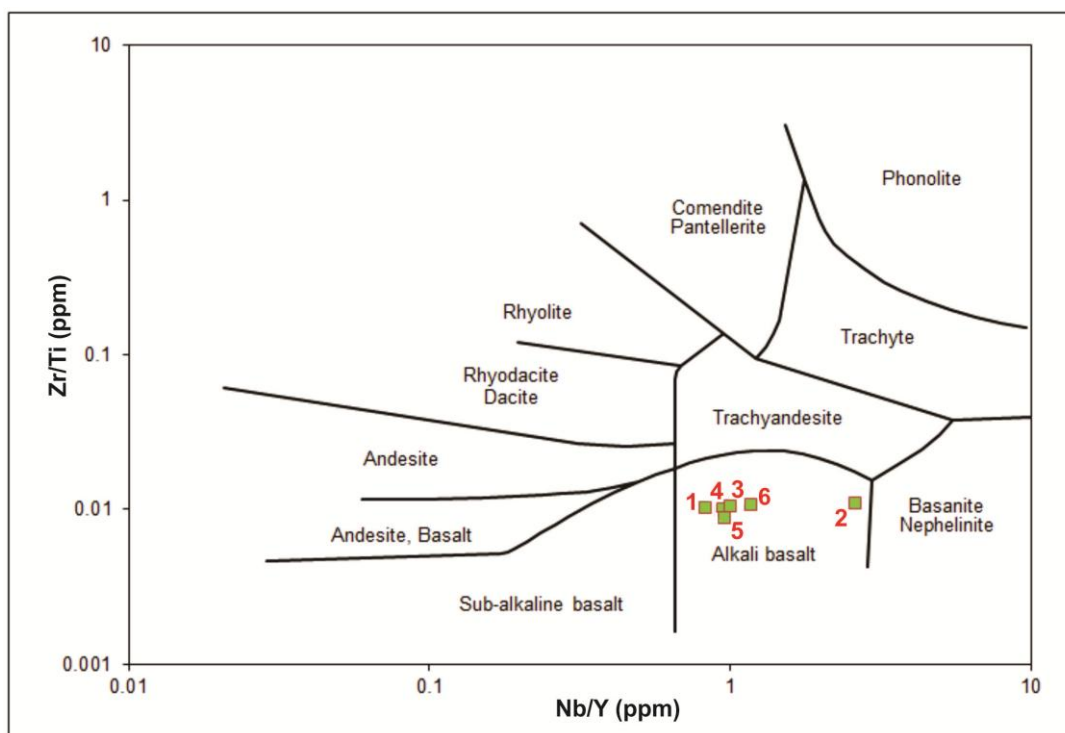


Figura 15 - Classificação das rochas metabásicas da região enfocada, baseado no diagrama de Winchester e Floyd (1977) para rochas vulcânicas utilizando elementos imóveis.

8. ANÁLISES DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X E DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Os minerais identificados a partir da difração de raios X das amostras de rochas dos depósitos do Fanadinho e Campo do Boa estão apresentados na Tabela 3. Como se pode observar, a mineralogia das rochas é constituída em maior parte por epidoto, albita, quartzo e adulária. Apesar de não ter sido identificado titanita pela difração de raios X, é possível observar que foi detectado traço do elemento Ti em três das quatro amostras analisadas pela fluorescência de raios X.

Tabela 3 - Resultados de fluorescência de raios X e difração de raios X para as amostras de rochas dos depósitos do Fanadinho e Campo do Boa.

	Depósito do Fanadinho		Depósito do Campo do Boa	
	Feldspato Branco	Feldspato Róseo	Epidosito	Rocha Brechóide
Elementos presentes (Fluorescência de Raio-X)	Si, Al, O (altos); Na (médio); Mg, Fe, Ca (baixos); P, S, Cu, Nb, Ta, Au (traços).	Si, Al, O (altos); Na (médio); K, Fe, Mg, Ti, Ca (baixos); Zr, P, Rb, Sr (traços).	Si, Al, O (altos); Fe, Ca (médios); Mg, Mn, Sr (baixos); Ti, S, P (traços).	Si, Al, O (altos); Fe, Ca (médios); Sr, Mg, Mn (baixos); Ti, V, S, P (traços).
Minerais presentes (Difração de Raio-X)	Albita (abundante); Epidoto (baixo); Quartzo (baixo).	Albita (abundante); Adulária (médio); Epidoto (baixo); Muscovita (traço).	Epidoto (abundante); Manganogrunerita (traço).	Epidoto (abundante); Quartzo (médio); Caulinita (traço).

É comum as titanitas serem razoavelmente ricas em elementos traço, particularmente os originados nos últimos estágios da cristalização de granitos ou pegmatitos, sendo referenciadas quantidades apreciáveis de nióbio, tântalo e vanádio (Deer et al., 2000).

9. ANÁLISES POR MICROSSONDA ELETRÔNICA

Para as análises feitas na microsonda eletrônica, foram utilizadas cinco amostras de titanita do depósito do Fanadinho e cinco amostras de titanita do depósito do Campo do Boa. Em cada uma dessas amostras, determinou-se a concentração dos óxidos de Al_2O_3 , FeO , CaO , SiO_2 e TiO_2 e fez-se uma média para seus teores em cada um dos depósitos. Como pode ser observado na Tabela 4, os valores obtidos na análise de cada amostra ficou bem próximo a essa média para todos os óxidos avaliados e as médias dos dois depósitos também apresentaram valores bem próximos entre si. Os padrões utilizados foram: Al_2O_3 – Al_2O_3 , FeO – wüstite, CaO – anortita; SiO_2 – forsterita, TiO_2 – rutilo, MgO – forsterita e Cr_2O_3 – Cr_2O_3 .

Tabela 4 - Concentração de óxidos maiores nas amostras dos depósitos de Capelinha e outros depósitos mundiais para serem usados como parâmetros de comparação, obtidos por microsonda eletrônica. N.A. (não analisado); TR (terras raras); TIF (titanita do Fanadinho); TIC (titanita do Campo do Boa); TIR (titanita da Rússia), TIS (titanita da Suíça) e TIE (titanita da Etiópia), conforme Deer et al. (1992). Dados de % em peso; todo ferro como Fe^{2+} .

TIF	Al_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	TiO_2	TR_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	F	H_2O	TOTAL
TIF 01	1,15	0,63	28,81	30,16	38,43	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	99,19
TIF 02	1,12	0,48	28,70	30,06	38,88	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	99,24
TIF 03	1,04	0,60	28,53	30,09	38,61	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,86
TIF 04	1,09	0,47	28,23	29,92	38,70	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,40
TIF 05	1,26	0,59	28,45	30,06	38,32	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,68
Média	1,13	0,55	28,54	30,06	38,59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,87
TIC	Al_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	TiO_2	TR_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	F	H_2O	TOTAL
TIC 01	1,18	0,62	28,45	29,87	38,52	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,64
TIC 02	1,07	0,51	28,37	30,02	38,84	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,82
TIC 03	1,18	0,46	28,30	29,84	38,58	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,36
TIC 04	1,15	0,47	28,43	29,93	38,44	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,42
TIC 05	1,03	0,55	28,45	30,04	38,55	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,62
Média	1,12	0,52	28,40	29,94	38,59	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	98,57
PARÂMETROS	Al_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	TiO_2	TR_2O_3	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	F	H_2O	TOTAL
TIR	0,00	0,14	27,2	30,44	39,66	0,37	0,05	0,00	0,37	0,00	0,61	0,64	99,48
TIS	3,95	1,93	27,85	31,28	33,33	1,06	0,00	0,04	0,04	0,03	N.A.	1,31	99,51
TIE	1,02	2,39	25,72	29,32	35,26	4,51	0,03	0,36	0,14	0,07	N.A.	0,82	98,82

Os teores de CaO , SiO_2 e TiO_2 das amostras de Capelinha estão compatíveis com os teores das amostras de titanita da Península de Kola (Rússia), de Valais (Suíça) e do nordeste de Harar (Etiópia), mostrados na Tabela 4. Porém, é importante destacar que os teores de Al_2O_3 e FeO apresentam uma variação considerável entre si, quando comparados os depósitos de Capelinha, da Rússia, da Suíça e Etiópia.

Análises de titanita obtidas por microsonda eletrônica e aperfeiçoamentos estruturais detalhados das espécies analisadas indicam que há um preenchimento de Si^{4+} nas posições tetraédricas, seguido pelo preenchimento de Al^{3+} e Fe^{3+} nas posições octaédricas das titanitas naturais. Existem algumas evidências que íons de Fe^{2+} podem tanto ocupar sítios octaédricos quanto excedentários na coordenação sete em sítios de Ca^{2+} (Deer et al., 2000). Portanto, esta oscilação considerável entre os teores de Al_2O_3 e FeO pode ser devido à essa ordem de preenchimento dos elementos constituintes deste mineral.

10. ANÁLISES DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – ESTUDO DAS CAUSAS DE COR

As principais causas de cor nas gemas são impurezas e imperfeições na rede cristalina. No presente estudo, foram analisadas algumas amostras de titanitas verde-amareladas e amarelo-esverdeadas de qualidade gemológica de diferentes localidades do Brasil, empregando-se

técnicas de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) em amostras naturais, amostras irradiadas com raios gama e amostras tratadas termicamente.

Além disso, foram feitas análises de absorção óptica em amostras naturais de titanita.

As impurezas ou centros de cor em titanita (CaTiOSiO_4) não são bem conhecidos. A análise por microsonda eletrônica mostrou que as titanitas estudadas são caracterizadas por um conteúdo muito baixo de impurezas de terras raras, actínídeos, ferro e vanádio.

A partir de amostras monocristalinas e pulverizadas do Bananal e de Capelinha, estado de Minas Gerais, e Xamboiá, no estado do Tocantins. As amostras foram submetidas à irradiação por raios gama, em doses de 200 kGy. As mesmas amostras também passaram por tratamento térmico, por um período de 1 hora em atmosfera controlada.

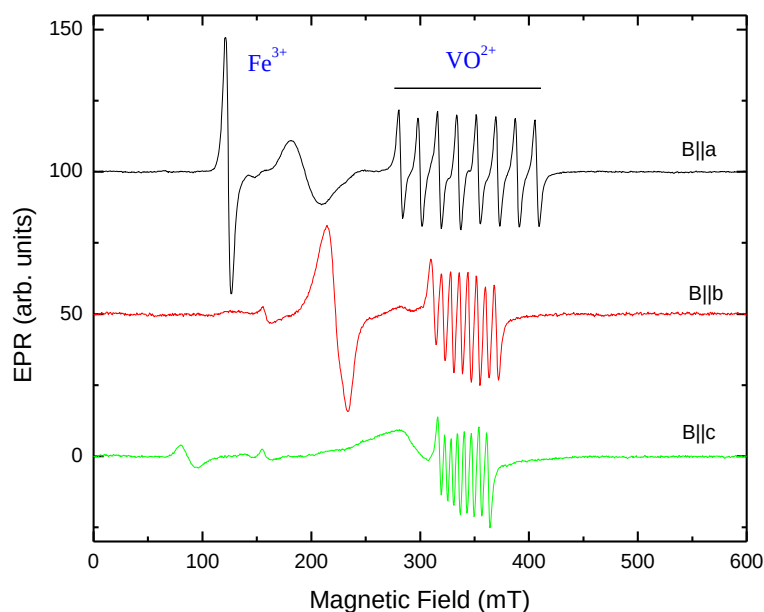


Figura 16 - Espectro de EPR mostrando a presença de Fe^{3+} e VO_2^{2+} para o campo magnético alinhada nos três eixos principais de cristal de titanita de Xamboiá.

Na figura 16 pode-se observar que três espectros de EPR da amostra de Xamboiá para três orientações de campo magnético em relação dos eixos cristalinos **a**, **b**, **c***. As linhas de EPR na faixa entre 100 e 300 mT correspondem ao Fe^{3+} com spin eletrônico de $S = 5/2$ e na faixa entre 300 e 400 mT ao V^{4+} em forma de íons de vanadila (VO_2^{2+}) com spin eletrônico de $S =$

1/2. A figura 17 mostra as dependências angulares completas de EPR em três planos cristalinos perpendiculares entre si juntamente com uma análise das dependências angulares para os íons de vanadila. Sem entrar em detalhes da análise das dependências angulares de EPR pode-se concluir que ambos os íons Fe^{3+} e V^{4+} se localizam em sítios octaédricos substituindo íons de titânio (Ti^{4+}).

Estudos de EPR em titanitas da Áustria, Suíça, Itália e Brasil (Vassilikou-Dova & Lehmann, 1988) relatam investigações de impurezas de vanádio e de ferro. As impurezas de ferro em titanitas também foram estudadas por espectroscopia Mössbauer (Muir, 1984; Holényi, 1987). A partir desses estudos, verificou-se que Fe^{3+} em sítios octaédricos é o dominante em titanitas naturais (80-90%) com pequenas quantidades de Fe^{2+} coordenadas octaédricamente (10-20%), ambos substituindo Ti^{4+} . No presente estudo, tentou-se fazer a espectroscopia de Mössbauer, mas a concentração de impurezas de ferro estava abaixo do limite de detecção nestas titanitas gemológicas.

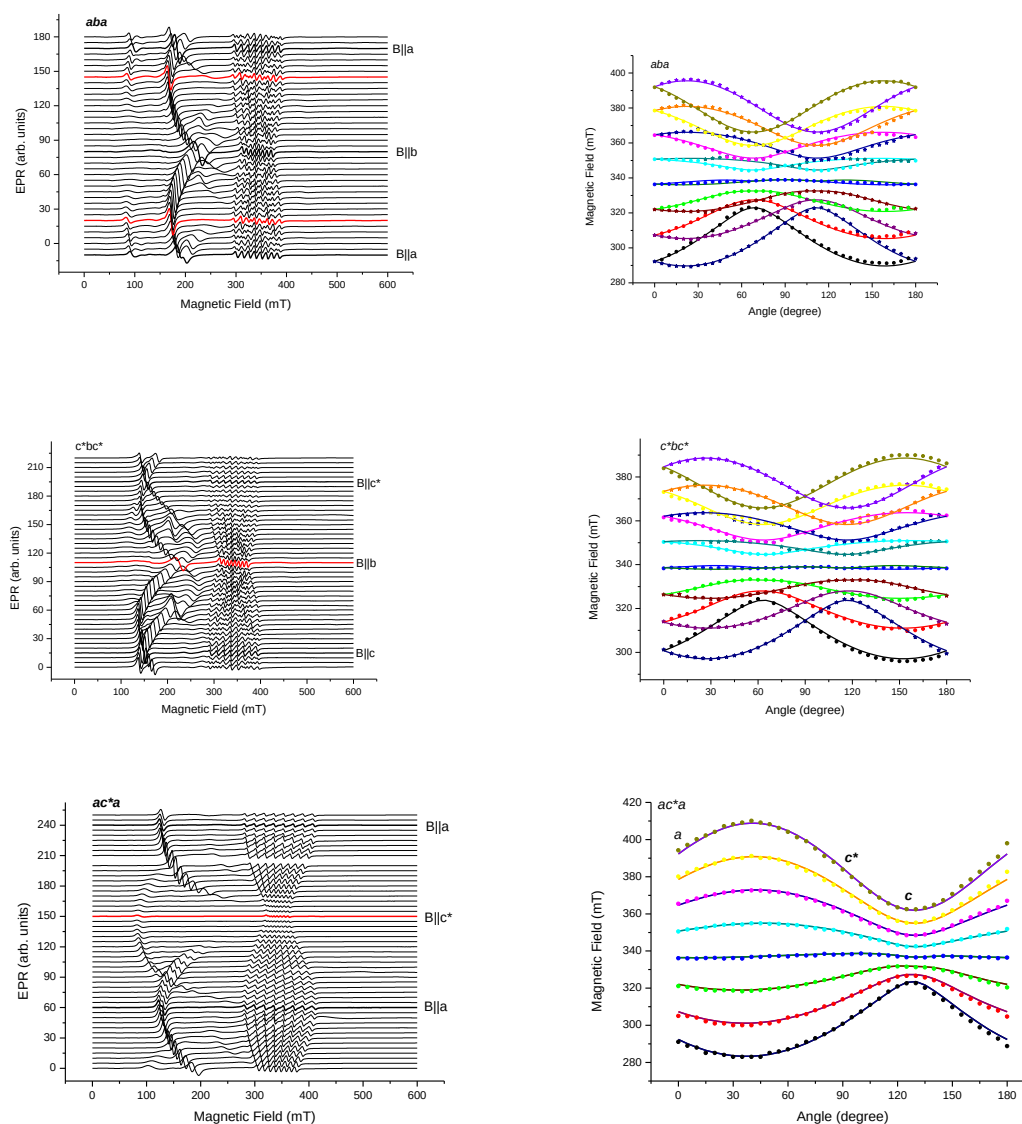


Figura 17 - À esquerda, espectros de EPR mostrando dependência angular em amostras de titanita de Xambioá nos planos cristalográficos aba, c^*bc^* e ac^*a . À direita, representação do ajuste das dependências angulares através de parâmetros de spin Hamiltonian.

A figura 18 mostra os espectros de EPR da amostra pulverizada do Bananal antes e após irradiação gamma com dose de 200 kGy. Notou-se que não ocorreu nenhuma alteração na cor e nem no espectro de ressonância paramagnética eletrônica (EPR). Assim, é possível concluir que as causas de cor nesta amostra devem-se às impurezas na rede cristalina da titanita e não devido a centro intrínsecos causados por irradiação ionizante.

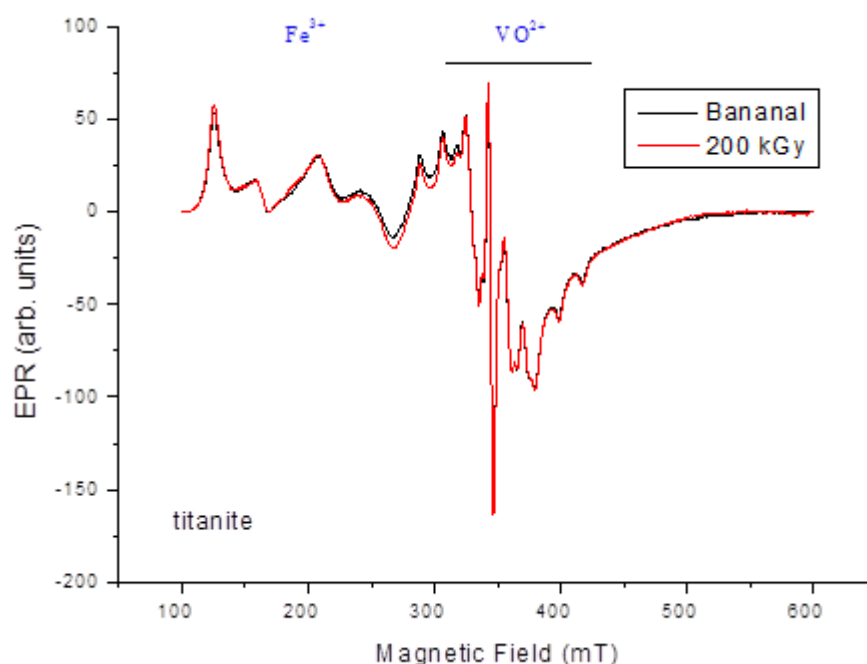


Figura 18 - Espectros de ressonância paramagnética eletrônica de titanita gemológica da região do Bananal, natural (linha preta) e irradiado a 200 kGy (linha vermelha).

Também foram realizados tratamentos térmicos em atmosferas controladas na amostra de titanita do Bananal, a fim de comparar os espectros de EPR da amostra natural com os espectros da amostra tratada termicamente em 600°C por 1 hora em atmosfera redutora de gás verde ($\text{H}_2:\text{N}_2$, 10:90) e em atmosfera oxidada por 1 hora a temperatura de 700°C.

Na Figura 19, são mostrados os espectros da titanita pulverizada natural e as tratadas termicamente. É possível observar através da variação do tamanho dos picos no espectro que a concentração de Fe^{3+} diminui quando a amostra é tratada em atmosfera redutora e aumenta quando a amostra é tratada em atmosfera oxidante. Quando a amostra é tratada em atmosfera redutora uma parte do Fe^{3+} passa para Fe^{2+} e quando é tratada em atmosfera oxidante uma parte do Fe^{2+} passa para Fe^{3+} . Desta forma podemos concluir que ambas as valências Fe^{2+} e Fe^{3+} estão presentes na amostra natural. Devemos lembrar que a EPR detecta somente a valência Fe^{3+} .

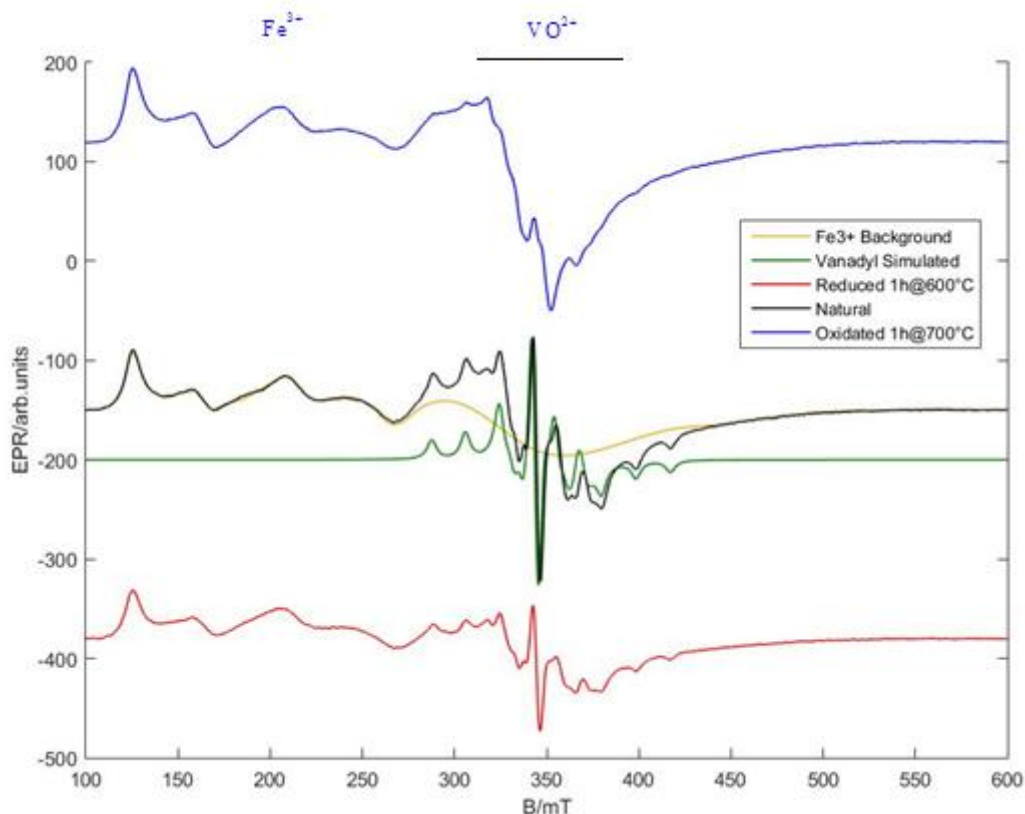


Figura 19 - Espectro de EPR em amostra de titanita do Bananal mostrando três diferentes estados de oxidação: natural (linha preta), reduzida (linha vermelha) e oxidada (linha azul).

Já para o V^{4+} (observado em forma de VO^{2+}), é possível notar que a quantidade de V^{4+} diminui para tratamentos térmicos tanto em atmosfera redutora quanto em atmosfera oxidante. Destes tratamentos conclui-se que o V^{4+} se transforma em V^{3+} em atmosfera redutora e em V^{5+} em atmosfera oxidante. Além disso, nas amostras naturais tem-se somente a presença de V^{4+} observado por EPR em forma de vanadila (VO^{2+}).

Os espectros de EPR de titanitas monocristalinas e pulverizadas mostraram a presença de Fe^{3+} e VO^{2+} , ambos substituindo íons de Ti^{4+} . Foi possível observar que a concentração de Fe^{3+} é maior em amostras amarelas e amarelo-esverdeadas, enquanto que VO^{2+} é maior em amostras de cor verde-amarelada. Também se constatou que os espectros de EPR e a cor não sofreram alteração quando comparadas amostras de titanita natural e irradiada. Além disso, através dos espectros de titanitas tratadas termicamente, observou-se que há indícios da presença de Fe^{3+} , Fe^{2+} e V^{4+} nas amostras naturais e tratadas termicamente.

11. ANÁLISES DE ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO ÓPTICA

Com o objetivo de auxiliar no estudo das causas de cor, foram realizadas medidas de absorção na região do ultravioleta e visível (Figura 20), nas mesmas amostras de titanitas gemológicas analisadas no EPR.

A Figura 20 representa o espectro de absorção das amostras do Bananal, do depósito do Campo do Boa (Capelinha) e Xambioá.

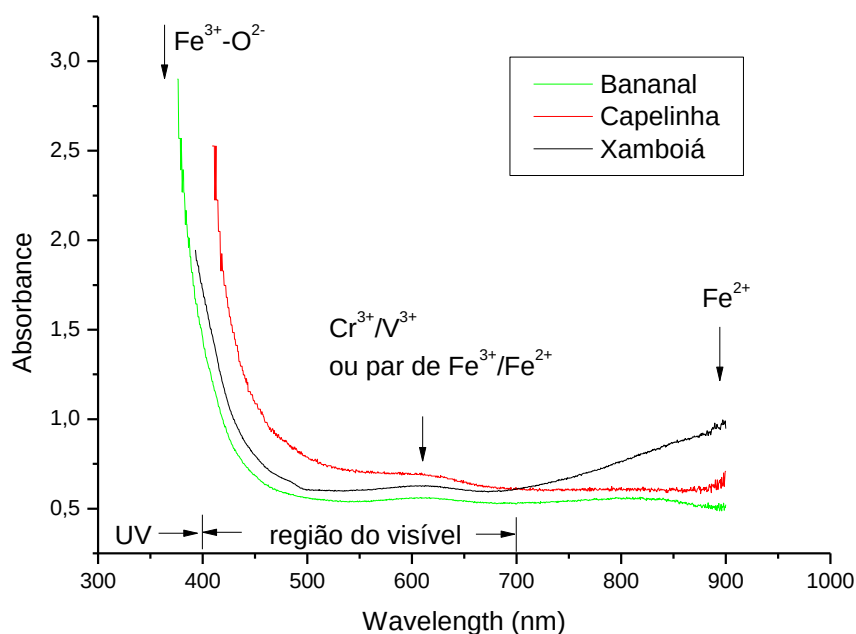


Figura 20 - Espectros de absorção óptica de amostras de titanita do Brasil medidas à temperatura ambiente.

Observam-se três contribuições para o espectro de absorbância nas amostras de titanitas: banda de absorção forte na região do ultravioleta próximo (400 - 450 nm), banda de absorção fraca na região do vermelho (600 nm) e banda de absorção na região do infravermelho próximo (900 nm).

É bem provável que Fe^{3+} em forma de transição de transferência de carga entre ferro e ligante seja responsável pela banda forte de absorção na região do ultravioleta próximo absorvendo parte da luz no visível na região do violeta e azul (400 - 450 nm), deixando as

titanitas com cor amarela. A origem da banda de absorção fraca em 600 nm é ainda bastante duvidosa. Têm-se três opções para interpretar essa banda: V^{3+} , Cr^{3+} ou pares de Fe^{2+}/Fe^{3+} . Como não há evidência da existência de V^{3+} em titanitas naturais (veja a discussão dos tratamentos térmicos) nem se tem evidência da existência de impurezas de Cr^{3+} nas titanitas analisadas, sugere-se que a última banda de absorção seja causada devido a uma transição de carga entre Fe^{3+} em sítios de Ti^{4+} e Fe^{2+} em sítios de Ca^{2+} . Na região do infravermelho, próximo a 900 nm, é possível observar que os espectros começam a ter um aumento na absorbância, principalmente na amostra de Xambioá. Acredita-se que este aumento seja devido à presença de Fe^{2+} em sítios octaédricos da titanita, provavelmente em sítios de Ti^{4+} .

12. INCLUSÕES FLUIDAS

Em uma seção bipolida foi realizada a descrição das inclusões fluidas presentes nos cristais de quartzo em equilíbrio com a titanita, uma vez que as inclusões fluidas presentes na titanita não puderam ser submetidas à microtermometria, pois apresentavam dimensões inferiores a 5 μm . As inclusões associadas em um mesmo domínio/área do cristal foram analisadas em grupos que representam uma *fluid inclusion assemblage*, ou FIA (Goldstein & Reynolds 1994).

Na Figura 21 são mostradas inclusões fluidas aquosas com baixa salinidade confirmada pelas temperaturas de fusão final do gelo variando entre $-0,2^{\circ}C$ e $-1,7^{\circ}C$. São inclusões pseudossecundárias com razão líquido/vapor variando de 5 a 20 e apresentando, em sua maioria, formato arredondado, por vezes irregular. Na fotomicrografia A é possível perceber a formação de várias trilhas de inclusões e na fotomicrografia B notam-se algumas inclusões que apresentam o formato *necking down* devido ao estrangulamento da inclusão, provavelmente durante evento de deformação do veio/rocha. Essas inclusões foram evitadas durante os estudos microtermométricos, pois o fluido vazou durante o estrangulamento.

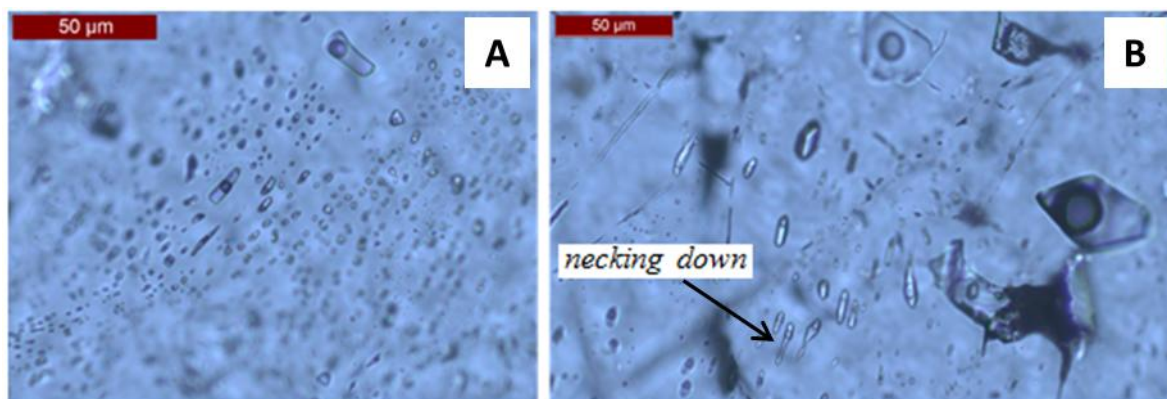


Figura 21 - Fotomicrografias de inclusões fluidas aquosas em cristais de quartzo associado à titanita, da região do Campo do Boa (Capelinha).

Através das temperaturas eutéticas registradas na Tabela 5, variando entre -22°C e $-24,3^{\circ}\text{C}$, foi possível concluir que o Na^{+} é o cátion mais abundante nas inclusões.

Tabela 5 - Resultados das análises de microtermometria em amostra de quartzo associado à titanita.

Veio	Mineral	Grupo	n	Tipo Inclusão *	Fases	% vapor	T _{eutética} ($^{\circ}\text{C}$)	T _{Fusão Final do Gelo} ($^{\circ}\text{C}$)	T _{Homogeneização} ($^{\circ}\text{C}$)	Salinidade (wt% NaCl)	Densidade (g/cm^3)
1	Quartzo	1	1	1	L - V	5	-22,0	-0,7	-	1,16	-
1	Quartzo	2	20	1	L - V	$17,5 \pm 4,4$	-22,0	$-0,6 \pm 0,2$	$306,4 \pm 26,4$	$0,94 \pm 0,36$	$0,69 \pm 0,05$
1	Quartzo	3	15	1	L - V	$10,7 \pm 2,6$	-24,1	$-0,2 \pm 0,1$	$286,1 \pm 24,0$	$0,40 \pm 0,16$	$0,72 \pm 0,06$
1	Quartzo	4	3	1	L - V	$15,2 \pm 5,6$	-24,3	$-0,4 \pm 0,3$	375,0	1,16	0,51
1	Quartzo	5	2	1	L - V	10	-23,2	$-0,2 \pm 0,4$	-	0,83	-
1	Quartzo	6	1	1	L - V	10	-	-1,7	-	2,79	-
1	Quartzo	7	4	1	L - V	$7,5 \pm 2,8$	-	-0,3	$271,0 \pm 20,1$	0,50	$0,76 \pm 0,04$

* 1 - Aquosa, pseudosecundária com razão líquido vapor de 5 a 20 e formato arredondado, por vezes irregular.

Para a determinação da salinidade e da densidade das inclusões, foi utilizado o programa Macflincor (Brown & Hagemann, 1995) e a equação de estado para o sistema H_2O -NaCl (Bodnar & Vityk, 1994).

As temperaturas de fusão final do gelo foram usadas para a determinação das salinidades das inclusões, registrando valores de salinidade entre 0,40 e 2,79 wt %NaCl.

As densidades das inclusões foram calculadas através das temperaturas de homogeneização registradas durante o aquecimento da amostra e apresentaram valores variando de 0,51 a 0,76 g/cm^3 . Para alguns grupos analisados durante a microtermometria não foi possível determinar as densidades das inclusões, pois as mesmas sofreram decrepitação durante o aquecimento, impossibilitando a análise de suas temperaturas de homogeneização.

Para estimar as temperaturas de aprisionamento de cada inclusão fluida, foi utilizado o gráfico de isócoras gerado no programa Macflincor (Figura 22), que relaciona a temperatura de homogeneização medida durante as análises com as curvas de pressão. Este gráfico é usado para determinar a temperatura de correção que será somada à temperatura de homogeneização a fim de se obter a temperatura de aprisionamento no momento de formação das inclusões.

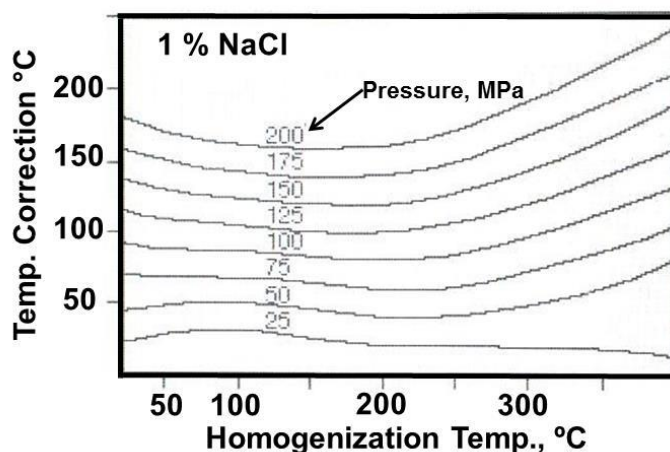


Figura 22 - Gráfico de isócoras gerado pelo programa Macflincor para fluidos com salinidade de 1%

Como a pressão dos fluidos hidrotermais no momento da formação das inclusões não é conhecida, foram feitas medidas para cada inclusão estimando-se as pressões de 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa e 200 MPa. A Tabela 6 representa os resultados de temperatura de aprisionamento para cada grupo de inclusões relacionado à pressão estimada no momento de sua formação.

Tabela 6 - Resultados de temperaturas de aprisionamento, em °C, relacionando cada grupo de inclusões analisado a um valor de pressão estimada.

	PRESSÃO ESTIMADA				
	Pressão atmosférica	50 Mpa	100 Mpa	150 Mpa	200 Mpa
GRUPO	T ^o Homogeneização (°C)	T ^o Aprisionamento (°C)			
1	-	-	-	-	-
2	306,4 ± 26,4	364,6 ± 36,6	409,6 ± 33,9	456,1 ± 34,6	503,6 ± 37,8
3	286,1 ± 24,0	334,0 ± 29,0	381,2 ± 31,1	426,8 ± 32,9	472,6 ± 34,7
4	375,0	446,0	500,0	554,0	605,0
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	271,0 ± 20,1	318,0 ± 23,1	362,7 ± 24,6	407,3 ± 26,1	452,0 ± 27,6

Analisando os resultados de temperatura de aprisionamento apresentados na Tabela 6, podem-se tirar as seguintes conclusões:

A temperatura de homogeneização obtida no momento das análises representa o comportamento das inclusões fluidas à pressão atmosférica, portanto a temperatura de aprisionamento será maior que este valor.

Também é possível observar que há um aumento de aproximadamente 50°C na temperatura de aprisionamento estimada para cada aumento de 50 MPa na pressão.

A grande maioria dos dados indica uma temperatura de aprisionamento entre 300-450°C, condizentes com as condições metamórficas de fácies anfibolito.

A idade de colocação dos fluidos hidrotermais ainda não pode ser exatamente estabelecida, mas algumas considerações podem ser assumidas. O metamorfismo foi de fácies anfibolito, o que implica em temperaturas da ordem de 300-400 °C (e.g., Miyashiro, 1973). Como tal faixa de temperatura é coincidente com as temperaturas de homogeneização apresentadas na Tabela 4, da ordem de 300-450 °C, possivelmente essas inclusões se formaram em idade semelhante ao do processo metamórfico (± 570 Ma), talvez associado ao arrefecimento do mesmo.

13. DISCUSSÕES GERAIS

Os resultados obtidos através de descrição petrográfica de lâminas delgadas, ressonância paramagnética eletrônica (EPR), absorção óptica e inclusões fluidas, associados aos dados de microsonda eletrônica, difração de raios X e fluorescência de raios X, permitem algumas interpretações sobre a titanita e o ambiente geológico em que esse mineral se formou.

Estudos preliminares sobre a petrografia e a mineralogia dos depósitos enfocados neste trabalho, foram feitos por Cassedanne & Cassedane (1971). A região de Capelinha e seu entorno foi incluída na Província Pegmatítica Oriental do Brasil nos trabalhos de Correia-Neves et al. (1986) e Lobato & Pedrosa-Soares (1993). O Projeto Espinhaço relacionou a mineralização dos depósitos de titanita a pegmatitos graníticos (Baars et al., 1997; Guimarães e Grossi-Sad, 1997). Entretanto, pegmatitos só foram de fato caracterizados na região no estudo de Castro (2014), associando sua gênese à “Suíte Mangabeiras”, constituída por granitos pós-orogênicos ao Orógeno Araçuaí e pertencentes à suíte “G4”, de acordo com as definições de Pedrosa-Soares et al. (2001, 2011).

Datações geocronológicas foram feitas por Castro (2014), para determinar as idades de sedimentação e do vulcanismo básico da Formação Capelinha, obtendo-se idades em torno de 970-960 Ma (U-Pb LA-ICP-MS em zircão) além de metamorfismo superimposto ocorrendo por volta de 570 Ma (U-Pb em titanita). Essa última idade é diferente das idades dos principais eventos hidrotermais, desenvolvidos ao final do colapso do Orógeno Araçuaí, entre 500-480 Ma (e.g., Chauvet et al., 2001; Chaves et al., 2010, 2017; Cabral e Zeh, 2015), que seria uma idade possível para os depósitos de titanita aqui caracterizados.

As rochas xistosas metassedimentares, bem como as metamáficas intercaladas concordantemente aos quartzitos da unidade inferior da Formação Capelinha também foram estudadas por Castro (2014) e apresentam, do ponto de vista petrográfico, paragênese mineral principal re-equilibrada em condições de fácies anfíbolito. Além disso, as análises geoquímicas confirmaram a composição basáltica indicada pela mineralogia metamórfica, dando indícios de que tais rochas tenham se formado em ambiente continental intraplaca.

Os estudos de inclusões fluidas realizados por Ribeiro et al. (2014) e de Morales et al. (2015) na região do Quadrilátero Ferrífero, ao sul da área estudada, também utilizaram os métodos de microtermometria (incluindo espectroscopia Raman) em veios de quartzo. As

descrições petrográficas contidas nesses trabalhos mostram que a maioria das inclusões são bifásicas, aquosas, com relação líquido vapor (L/V) próximo a 9:1, apresentando formato poligonal, às vezes arredondados. Com o tamanho médio dessas inclusões variando de $< 5 \mu\text{m}$ a $\sim 15 \mu\text{m}$, atingindo dimensões de até $\sim 40 \mu\text{m}$. As inclusões fluidas presentes nos veios de quartzo de ambos estudos apresentem $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4-\text{NaCl}$ em sua composição, com salinidade variando de baixa ($\sim 2\% \text{ wt.}\% \text{ NaCl}$) a moderada ($\sim 9\% \text{ wt.}\% \text{ NaCl}$).

No trabalho de Morales et al. (2015), foi utilizado um geotermômetro de arsenopirita, obtendo-se uma temperatura de formação do fluido hidrotermal entre 300 e 375°C. Fazendo-se a interseção com o gráfico das isócoras, obteve-se um valor de pressão mínima de 260 Mpa.

No entanto, o processo utilizado no presente trabalho foi o inverso do utilizado por Morales et al. (2015), pois não haviam dados da pressão e nem da temperatura do fluido hidrotermal específicos para a região estudada. Neste caso, foram feitas variações da pressão estimada de 50 a 200 Mpa para obter o valor usado na correção da temperatura de aprisionamento dos fluidos hidrotermais que formaram as inclusões fluidas na região de Capelinha. Obteve-se assim temperaturas de aprisionamento variando principalmente entre 300 e 450°C.

Apesar da idade de colocação dos fluidos hidrotermais não poder ser estabelecida com exatidão, algumas considerações podem ser feitas. O metamorfismo superimposto foi de fácies anfibolito (Castro, 2014), o que implica em temperaturas da ordem de 350-450°C (e.g., Miyashiro, 1973). Como tal faixa de temperatura é coincidente com as temperaturas de homogeneização dadas pelo estudo das inclusões fluidas, em geral da ordem de 300-450°C, isso significa que elas possivelmente se formaram em idade semelhante ao do processo metamórfico ($\pm 570 \text{ Ma}$). Os estudos petrográficos apontam provavelmente para uma fase posterior, associada ao arrefecimento do processo metamórfico.

As análises de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) e de absorção óptica, com a finalidade de estudar a causa de cor na titanita, haviam antes sido feitas em amostras da Áustria, Suíça, Itália e Brasil (Vassilikou-Dova & Lehmann, 1988). Esses trabalhos relatam investigações de impurezas de vanádio e ferro, sendo que todas as amostras possuíam coloração amarelo esverdeadas e foram orientadas de acordo com sua morfologia, obtendo-se

resultados que indicam que o VO^{2+} e o Fe^{3+} substituem o Ti^{4+} na estrutura cristalina da titanita.

A existência desses cátions VO^{2+} e Fe^{3+} também foram confirmadas no presente estudo, por meio de análises de EPR e absorção óptica. De tal maneira, acredita-se que a coloração amarelo esverdeada também seja causada pela presença do íon Fe^{3+} . Já sobre a cauda de cor verde, que há indícios de ser devido ao íon V^{3+} , não foi possível de ser comprovada através dos resultados deste trabalho, sendo necessária a realização de algumas análises complementares, utilizando ainda amostras de outras localidades geográficas.

14. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou contribuir para o conhecimento acerca da titanita e seus ambientes de formação, aumentando a compreensão sobre os depósitos estudados nas áreas do Fanadinho e Campo do Boa, região de Capelinha (MG).

O protólito das rochas xistosas encaixantes da mineralização foi determinado como um basalto.

Comparando-se os resultados mineralógicos obtidos pela descrição microscópica das lâminas delgadas com as análises de difração/fluorescência de raios X, pode-se observar que quase todos os minerais (e elementos químicos contidos) identificados por este método foram também identificados através da microscopia óptica, confirmando os resultados gerais obtidos para identificação de minerais principais – pois, na maioria das amostras, a difração de raios X foi capaz de identificar apenas os minerais mais importantes.

Os elementos químicos detectados na fluorescência de raios X complementaram essas análises, uma vez que mostram elementos constituintes dos minerais secundários que foram observados pela microscopia óptica, mas não foram identificados na difração de raios X.

Além disso, os resultados das análises de microsonda eletrônica mostraram que as titanitas dos depósitos do Fanadinho e Campo do Boa apresentam os teores dos óxidos Al_2O_3 , FeO , CaO , SiO_2 e TiO_2 muito similares entre si e com alguns desses valores próximos de outros depósitos mundiais de titanita, como da Rússia, Suíça e Etiópia.

Com relação às causas de cores das titanitas, foi possível concluir, por meio de análises de EPR e absorção óptica, que a cor amarela é causada pelo íon Fe^{3+} . Sobre a causa da cor verde nas amostras de titanitas analisadas, que acreditava ser devido ao íon V^{3+} , não foi possível chegar a uma conclusão concreta, pois os picos de V^{4+} no espectro de EPR das amostras oxidadas não registraram aumento. Ou seja, para que a presença de V^{3+} pudesse ser comprovada, os picos de V^{4+} deveriam aumentar nos espectros de titanita oxidada, assim como ocorreu com os picos de Fe^{3+} , pois o Fe^{2+} oxidou a Fe^{3+} , aumentando a quantidade deste íon. Também foi possível observar que a irradiação com raios gama a 200 kGy não provocou alteração na cor típica das titanitas estudadas.

Por meio das análises de inclusões fluidas, determinou-se que o Na^+ é o cátion mais abundante nessas inclusões e que as mesmas possuem valores muito baixos de salinidade (entre 0,40 e 2,79% NaCl) e densidade (0,51 a 0,76 g/cm³). Também se conseguiu relacionar a temperatura de aprisionamento dos fluidos hidrotermais calculada neste trabalho com estudos a respeito do processo metamórfico que ocorreram na região de Capelinha, acreditando-se que a formação dessas inclusões seja de idade semelhante ao processo metamórfico superimposto, que foi da fácies anfibolito, ocorrido em ± 570 Ma.

O presente trabalho permitiu melhorar a compreensão acerca da titanita dos depósitos do Fanadinho e Campo do Boa. Em suma: extrusão do vulcanismo basáltico, rico em titânio, intercalado aos sedimentos quartzosos da Formação Capelinha, base do Grupo Macaúbas na região homônima, entre 970-960 Ma; metamorfismo regional sob condições de fácies anfibolito em 570 Ma, relacionado ao desenvolvimento do Orógeno Araçuai durante o Ciclo Brasileiro, com a presença de titanita metamórfica indicando um provável pré-enriquecimento em titânio; hidrotermalismo tardio, relacionado ao mesmo processo metamórfico, cujos fluidos residuais, levaram à formação de veios hidrotermais ricos em titanita, além de epidoto, apatita e ilmenita.

Pode-se considerar que este trabalho alcançou a maioria de seus objetivos, contribuindo para o aumento do conhecimento sobre as titanitas dessa região de Minas Gerais e seus ambientes de formação.

O único objetivo proposto e não concluído neste trabalho foi acerca da determinação da causa de cor verde na titanita, pois os resultados de EPR e absorção óptica foram inconclusivos sobre a presença ou não de V^{3+} . Ficando como proposta de um trabalho futuro a

realização de mais alguns testes de EPR em amostras de titanita com uma tonalidade mais forte de verde.

REFERÊNCIAS

- BAARS, F., GROSSI-SAD, J. H., MOTTA, E., PEDROSA-SOARES, A. C., UHLEIN, A. 1996. *Mapa Geológico da Folha Capelinha, Minas Gerais*. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: Projeto Espinhaço, Convênio COMIG/IGC-UFMG.
- BAARS, F.J.; GROSSI-SAD, J.H.; FONSECA, E. 1997. Geologia da Folha de Capelinha. In: Grossi-Sad, J. H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares, A. C. & Soares-Filho, B. S. Projeto Espinhaço em CD-ROM. Belo Horizonte, COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais, 14: 1373-1574.
- BODNAR, R. J. & VITIK, M. O. 1994. Interpretation of microthermometric data for NaCl-H₂O fluid inclusions. In: B. De Vivo, M. L. Frezzotti (Eds.), *Fluid inclusions in minerals: methods and applications* (v. VA, 117 - 131). Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University.
- BROWN, P.E. & HAGEMANN, S.G. 1995. The program MacFlinCor and its application to geobarometry in Archean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3943-3952.
- CABRAL, A. R. & ZEH, A. 2015. Detrital zircon without detritus: a result of 496-Ma-old fluid-rock interaction during the gold-lode formation of Passagem, Minas Gerais, Brazil. *Lithos*, 212-215, 415-427.
- CASSEDANNE, J. & CASSEDANNE, J. 1971. The sphene deposit of Campo do Boa, Capelinha, Minas Gerais. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 43, 399-405.
- CASTRO, M.P. 2014. Caracterização Geológica da Formação Capelinha Como uma Unidade Basal do Grupo Macaúbas em Sua Área Tipo, Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geociências). Universidade Federal de Ouro Preto, 114 p.
- CHAUVET, A.; PIANTONE, P.; BARBANSON, L.; NEHLIG, P.; PEDROLETTI, I. 2001. Gold deposit formation during collapse tectonics: structural, mineralogical, geochronological, and fluid inclusion constraints in the Ouro Preto gold mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, 96, 25-48.

CHAVES, M.L.S.C. 1987. Novas contribuições à geologia da região de Diamantina (MG). 4º Simp. Geol. MG, Atas, p. 72-87, Belo Horizonte.

CHAVES, M. L. S. C.; BRANDÃO, P. R. G.; BUHN, B. 2010. Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, geocronologia e implicações geológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 40, 506-515.

CHAVES, M. L. S. C.; BUHN, B.; DIAS, C. H.; MENEZES FILHO, L. A. D. 2017. Idades U-Pb em xenotímio-(Y) de um veio de quartzo com almeidaíta e parisita-(la), novos minerais encontrados na Serra do Espinhaço (Novo Horizonte, BA). *Geociências*, 36 (submetido).

CIDADE BRASIL, disponível em: <<http://www.cidade-brasil.com.br/municipio-capelinha.html>>. Acesso em 25 de novembro de 2015.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1992. *Minerais Constituintes das Rochas*. Lisboa: Editora Fundação Calouste Gulbenkian – 2. edição. p. 41-44.

FONTES, C.Q.; PEREIRA, A.D.C.; NETTO, C.; PEREIRA, F.S.; LIMA JUNIOR, L.O.; COSTA, M.R.A.; BALTAZAR, O.F.; SILVA, S.L.DA.; VIEIRA, V.S.; FERRARI, P.G.; RAMALHO, R. 1978. Projeto Jequitinhonha. Escala 1:250.000. Belo Horizonte: CPRM; DNPM, 1978.

GUIMARÃES, M.L.V. & GROSSI-SAD, J.H. 1997. Geologia da Folha de Malacacheta. In: Grossi-Sad, J.H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares A.C.; Soares-Filho, B.S. Projeto Espinhaço em CD-ROM. Belo Horizonte, COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais, 15,1505-1574.

HETTICH, M. 1977. A glaciação proterozóica no centro-norte de Minas Gerais. *Rev. Bras. Geociências*, 7, 87-101.

HOLÉNYI, K. & ANNERSTEN, H. 1987. Iron in titanite: a Mössbauer-spectroscopy study. *Canadian Mineralogist*, 25, 429-433.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS. 2009. Manual Técnico de Gemas / IBGM, DNPM. – 4. ed. rev. e atual. / Consultoria, supervisão e revisão técnica desta edição, Jane L. N. da Gama. - Brasília, p. 37.

INTERNATIONAL GEM SOCIETY. 2014. Sphene Jewelry and Gemstone Information. Disponível em: <<http://www.gemsociety.org/article/sphene-jewelry-and-gemstone-information/>>. Acesso em: 12 Set. 2014.

MONGIORGI, R. & RIVA DI SANSEVERINO, L. 1968. A reconsideration of the structure of titanite, CaTiOSiO_4 . *Min. Petr. Acta*, 14, 123-141.

MORALES, M.J.; SILVA, R.C.F.E.; LOBATO, L.M.; GOMES, S.D.; GOMES, C.C.C.O.; BANKS, D.A. 2015. Metal source and fluid-rock interaction in the Archean BIF-hosted Lamego gold mineralization: Microthermometric and LA-ICP-MS analyses of fluid inclusions in quartz veins, Rio das Velhas greenstone belt, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 72, 510–531.

MUIR, I. J.; METSON, J. B.; BANCROFT. 1984. ^{57}Fe Mössbauer spectra of perovskite and titanite. *Canadian Mineralogist*, 22, 689-694.

PAUL, B. J.; CERNY, P.; CHAPMAN, R.; HINTHORNE, J. R. 1981. Niobian titanite from the Huron Claim pegmatite, southeastern Manitoba, *The Canadian Mineralogist*, 32, 575-587.

PEDROSA-SOARES, A.C.; DARDENE, M.A.; HASUI, Y.; CASTRO, F.D.C. 1994. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, 1:1.000.000. Belo Horizonte, SEME-COMIG, 97 p.

SGARBI, G.N.C. 2007. Petrografia Macroscópica das Rochas Ígneas, Sedimentares e Metamórficas. Belo Horizonte: Editora UFMG, p. 474-481.

RIBEIRO, Y.; SILVA, R.C.F.E.; LOBATO, L.M.; LIMA, L.C.; RIOS, F.J.; HAGEMANN, S.G.; CLIFF, J. 2014. Fluid inclusion and sulfur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulfide veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 67, 11–33

SILVA, A.L. 2014. Caracterização Petrográfica e Geotermobarométrica dos Xistos Pelíticos da Formação Capelinha na Região Homônima, Orógeno Araçuaí, MG. Trabalho de Conclusão de Curso (Departamento de Geociências). Universidade Federal de Ouro Preto, 102 p.

SPEER, J. A. & GIBBS, G. V. 1976. The crystal structure of synthetic titanite, CaTiOSiO_4 , and the domain texture of natural titanites. *American Mineralogist*, 61, 238-247.

UHLEIN, A. 1991. Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. Aspectos estratigráficos e estruturais. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 295 p.

VASSILIKOU-DOVA, A. B. & LEHMANN, G. 1988. EPR of V^{4+} and Fe^{3+} in Titanites. *Phys. Chem. Min.*, 15, 559-563.

ZACHARIASEN, W. H. 1930. The crystal structure of titanite. *Z. Kristallogr.*, 73, 7-16.

ANEXO I – Paper submetido à revista Geologia USP Série Científica (B2 CAPES).

GEOLOGIA, MINERALOGIA, INCLUSÕES FLUIDAS E GÊNESE DOS DEPÓSITOS DE TITANITA-EPIDOTO DE CAPELINHA, MINAS GERAIS

GEOLOGY, MINERALOGY, FLUID INCLUSIONS AND GENESIS OF TITANITE- EPIDOTE DEPOSITS FROM CAPELINHA, MINAS GERAIS

Título curto: Depósitos de titanita-epidoto de Capelinha, MG

Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves^{1*}

Eder Luiz Tolentino Junior¹

Coralie Heinis Dias¹

Antônio Wilson Romano¹

¹ Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

E-mails: mlschaves@gmail.com, tolentino.eder@yahoo.com.br, co.dias.minas@gmail.com, romanoaw@gmail.com

* Autor correspondente - Av. Antônio Carlos 6627, CEP 31.270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. Telefone: +55 (31) 3409-4456.

Número de palavras: 7338

Número de figuras: 10

Número de tabelas: 6

RESUMO

Nas proximidades da cidade de Capelinha (Minas Gerais) ocorrem depósitos de titanita-epidoto associados a veios pegmatoides ricos em albita e/ou adularia, nos arredores de duas localidades principais conhecidas como Campo do Boa e Fanadinho. Tais depósitos estão hospedados em um xisto metavulcânico básico, rico em titânio, composto principalmente por albita, epidoto, actinolita, titanita e quartzo, relacionado à Formação Capelinha (Grupo Macaúbas), de idade toniana; o protólito dessa rocha foi determinado como um álcali-basalto, que foi metamorfozado em fácies anfibolito. A espessura dos veios varia entre alguns decímetros até cerca de 4 m; eles são constituídos principalmente por albita, parcial a inteiramente caulinizada na área do Fanadinho, onde também são mais ricos em epidoto. Quartzo é raro, enquanto as micas são ausentes. Análises por DRX, FRX, microsonda eletrônica e inclusões fluidas permitiram caracterizar a titanita e minerais associados nestes depósitos. A titanita (mais raramente o epidoto) pode formar drusas excepcionais, muito apreciadas por colecionadores de minerais, cujos monocristais em geral maclados podem alcançar alguns centímetros ao longo do eixo “c”. Outros minerais importantes nesses veios, embora incomuns, são apatita, ilmenita e actinolita. Inclusões fluidas indicaram uma temperatura de cristalização na faixa de 300-400°C. Em termos genéticos, tal mineralização relaciona-se, primeiramente, à extrusão dos basaltos ricos em Ti, os quais foram metamorfisados no Ciclo Brasileiro (± 570 Ma), com provável formação e enriquecimento de titanita. As temperaturas encontradas de aprisionamento das inclusões fluidas são plenamente compatíveis com as condições de fácies anfibolito. Esses dados indicam que os fluidos hidrotermais percolaram as rochas encaixantes ainda no processo de metamorfismo, provavelmente ao final deste processo.

Palavras-chave: Titanita; Epidoto; Capelinha; Minas Gerais.

ABSTRACT

Near Capelinha town (Minas Gerais State) titanite-epidote deposits occur associated with pegmatoid veins, albite and/or adularia rich, around two main distinct sites known as Campo do Boa and Fanadinho. These deposits are hosted by a Ti-rich, metavolcanic basic schist, mainly composed by albite, epidote, actinolite, titanite and quartz, related to the Capelinha Formation (Macaúbas Group), of Tonian age; this rock protholite has been identified as an alkali-basalt, metamorphosed at amphibolite facies. The thickness of these veins varies from decimeters to about 4 m; they are mainly composed by albite, which is partial to entirely kaolinized in the Fanadinho area, where they also are richer in epidote. Quartz is rare, and micas are absent. RXD, RXF, electronic microprobe analyses, and fluid inclusions, allowed to characterize titanite and the main associated minerals in the deposits. Titanite (and more rarely epidote) can form exceptional druses, very appreciated by mineral collectors, with monocrystals commonly twined and reaching few centimeters along the “c” axis. Apatite, ilmenite and actinolite, though unusual, are other important minerals in those veins. Fluid inclusions indicated a crystallization temperature in the range of 300-400°C. Mineralization is genetically related, firstly, to the extrusion of Ti-rich basalts, which have been metamorphosed during the Brasiliano Cycle (± 570 Ma), probably associated with titanite growth and enrichment. Temperatures found for fluid inclusions trapping are completely compatible with amphibolite facies conditions. These data indicate that hydrothermal mineralizing fluids percolated surrounding rocks still during metamorphism, probably at its final stage.

Keywords: Titanite; Epidote; Capelinha County; Minas Gerais State.

INTRODUÇÃO

Algumas dezenas de veios e bolsões de feldspato com titanita-epidoto, associados a rochas metavulcânicas neoproterozoicas, são conhecidos a nordeste e noroeste de Capelinha, Minas Gerais, desde o final da década de 1960. Tais depósitos foram descobertos na localidade conhecida como Campo do Boa (a noroeste da cidade) e fornecem ainda atualmente drusas e amostras de cristais para coleção de alta qualidade, além de abundante material com aproveitamento gemológico. No final dos anos 1990, encontraram-se novos depósitos similares a nordeste da cidade, na área do baixo Ribeirão Fanadinho. Esses depósitos, também em plena produção, mostraram-se muito mais ricos e variados mineralogicamente do que os primeiros, tendo já fornecido toneladas de material para amostras de coleção, principalmente em agregados com epidoto em matriz de albite e/ou adulária.

O objetivo principal deste trabalho é o de apresentar novos dados quanto à geologia e petrografia local e à mineralogia associada (particularizando análises de raios X, microsonda eletrônica e inclusões fluidas), dessas áreas mineralizadas ao norte de Capelinha. A partir desses dados, procurou-se desenvolver um modelamento genético integrado para tais depósitos, tentando ainda estabelecer um possível relacionamento destes com a Província Pegmatítica Oriental do Brasil, onde geograficamente se situam.

SÍNTESE GEOLÓGICA REGIONAL

A região de Capelinha está situada na porção centro-nordeste de Minas Gerais, na borda leste da Serra do Espinhaço. Essa região é ainda pouco conhecida em termos geológicos. Mapeamento de cunho regional, na escala 1:250.000, deve-se a Fontes et al. (1978), no âmbito do “Projeto Jequitinhonha” (DNPM/CPRM). Posteriormente, o “Projeto Espinhaço” (COMIG/IGC-UFMG) levantou grande parte da serra homônima em Minas

Gerais (incluindo suas margens) na escala de 1:100.000, abrangendo as áreas onde se localizam as mineralizações de titanita-epidoto, inseridas nas folhas Capelinha (Baars et al., 1996) e Malacacheta (Guimarães et al., 1996). Nesses trabalhos foram reconhecidas três unidades litoestratigráficas maiores, pré-cambrianas – as formações Serra Negra (Grupo Guanhães), Capelinha e Salinas (ambas do Grupo Macaúbas), da base para o topo, cobertas por sedimentos detrítico-lateríticos neógenos (Figura 1).

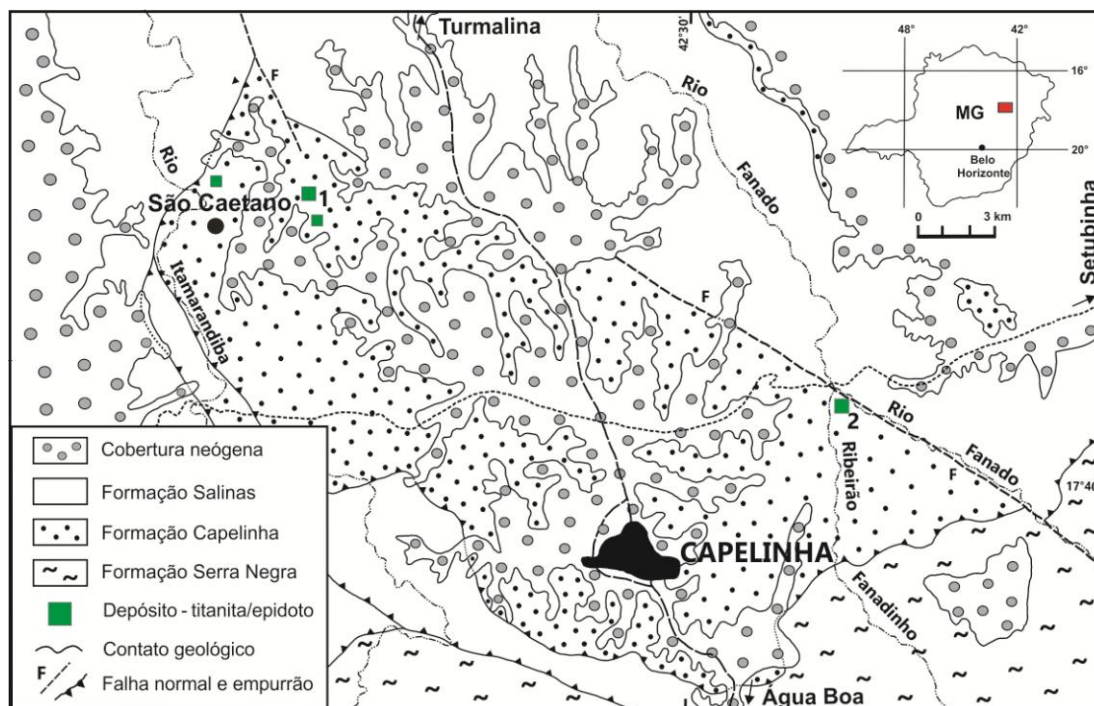


Figura 1. Mapa geológico da região de Capelinha (parcial e modificado de Baars et al., 1996, e Guimarães et al., 1996) mostrando as duas principais áreas de produção de titanita-epidoto: 1 – Campo do Boa, 2 – Fanadinho. No alto, à direita, posição da área do mapa em relação ao Estado de Minas Gerais.

A Formação Serra Negra (Grupo Guanhães) aflora segundo uma faixa leste-oeste ao sul de Capelinha (Figura 1), constituindo o extremo norte da “Serra Negra”. Esta estrutura foi considerada por Uhlein (1991) como formada por faixas alternantes de rochas gnáissicas arqueanas, com rochas xistosas e quartzíticas atribuídas ao Supergrupo Minas (Paleoproterozoico). No Projeto Espinhaço (Baars et al., 1997; Guimarães e Grossi-Sad, 1997), assumiu-se que ambas as sequências eram partes de um mesmo conjunto litoestratigráfico, com biotita gnaisses bandados e laminados, localmente milonitizados ou migmatizados, além de intercalações de anfibolitos, rochas calciossilicáticas, micaxistos e quartzitos ocorrendo localmente no topo da sequência. Esses metassedimentos foram depositados no Arqueano (Uhlein, 1991), embora estudos geocronológicos de maior detalhe ainda sejam necessários. A Formação Serra Negra é cavalgada por litotipos mais novos das formações Capelinha e Salinas.

A Formação Capelinha, que contém os depósitos estudados, foi descrita por Grossi-Sad et al. (1993) e Noce et al. (1997), posicionada no topo do Grupo Macaúbas acima da Formação Salinas. Um empilhamento estratigráfico diferente para este grupo foi proposto recentemente por Castro (2014) redefinindo a Formação Capelinha na porção basal do Grupo Macaúbas, de idade toniana e equivalente a outras sequências “pré-glaciais” de tal sequência. Esse último autor designou uma “Unidade Inferior” constituída de quartzitos, quartzitos micácios e

quartzo xistos, com intercalações de rochas metabásicas (anfíbolitos), que tipificaram originalmente a unidade (Grossi-Sad et al., 1993), e uma “Unidade Superior” constituída de micaxistos localmente com granada e/ou estauroлита, além de raras intercalações de xistos carbonosos, os quais, no Projeto Espinhaço foram incluídos na Formação Salinas (Baars et al., 1996; Guimarães et al., 1996).

Como as áreas enfocadas no presente estudo estão inseridas na unidade basal, que constituía a Formação Capelinha original (quartzitos e metavulcânicas), preferiu-se adotar a cartografia e nomenclaturas utilizadas naquele projeto. Esta formação ocupa as porções de relevo mais baixo, a norte e noroeste da cidade, em uma faixa de direção NW-SE desde a localidade de São Caetano (Figura 1). As melhores exposições de quartzito, seu principal litotipo, podem ser observadas nas frentes de lavra do Campo do Boa (Figura 2A). Estruturas sedimentares originais são localmente bem preservadas, como estratificações plano-paralelas e cruzadas de baixo ângulo (Figura 2B). A Formação Salinas (ou “Unidade Superior” da Formação Capelinha) aflora em extensa região a oeste, norte e leste da cidade de Capelinha. Ao sul, seus litotipos ocorrem empurrados sobre o Grupo Guanhões, em contatos definidos por zonas cisalhadas (Baars et al., 1996; Guimarães et al., 1996).

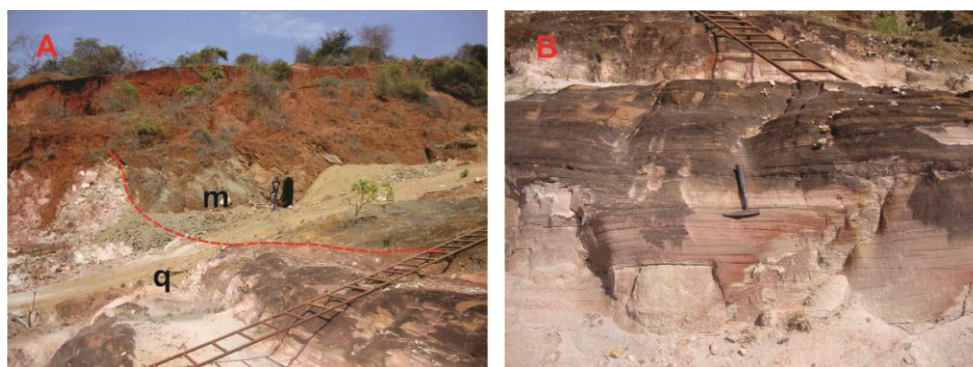


Figura 2. Prancha apresentando, A. Visão geral na área do Campo do Boa, observando-se (tracejado vermelho) o contato de quartzito branco rosado da Formação Capelinha (q) sobreposto por rochas metavulcânicas (m), esverdeadas, onde se desenvolve a garimpagem dos veios de titanita-epidoto. B. Detalhe do quartzito inferior, apresentando estratificações plano-paralela e cruzada de baixo ângulo.

Em termos geotectônicos, tal região insere-se num setor tectono-metamórfico complexo do Orógeno Araçuai, designado de “Domínio Capelinha” (Pedrosa-Soares et al., 1993) ou “Faixa de Dobramentos Capelinha” (Queiroga et al., 2016), onde estruturas pós-colisionais relacionadas ao colapso do orógeno estão superimpostas a estruturas colisionais do mesmo. Castro (2014) obteve datações U-Pb para zircões do xisto hospedeiro da mineralização. A população mais jovem, magmática e indicadora da idade de cristalização da rocha, foi datada em 957 ± 14 Ma (idade concórdia). De modo análogo, zircões detríticos dos quartzitos associados na mesma sequência, forneceram uma idade máxima de sedimentação em torno de 970 Ma, confirmando uma idade toniana. Ainda segundo esse autor, o metamorfismo superimposto ocorreu por volta de 570 Ma (U-Pb em titanita), sob condições de fácies anfíbolito e definindo sua idade brasileira.

Nos trabalhos de campo, realizou-se uma seção geológica entre as áreas do Campo do Boa e do Fanadinho. Seguindo a informação de garimpeiros sobre uma possível ocorrência de “ametista” nas cercanias do primeiro local, descobriu-se no Córrego Santa Catarina um corpo pegmatítico com cerca de 0,5-0,7 m de espessura (Figura 3A), subconcordante com a foliação do xisto milonítico encaixante, de atitude $N20^{\circ}W/15-20^{\circ}NE$. Esse xisto se assemelha a um

dos litotipos típicos da Formação Serra Negra, podendo assim constituir um enclave tectônico de tal sequência na área; entretanto, eles poderiam também constituir parte da própria Formação Capelinha em zona de cisalhamento. O pegmatito, homogêneo e não zonado, é formado por quartzo, microclínio, muscovita, schorlita e, principalmente, lepidolita, dando um aspecto roxo forte ao corpo (Figura 3B).

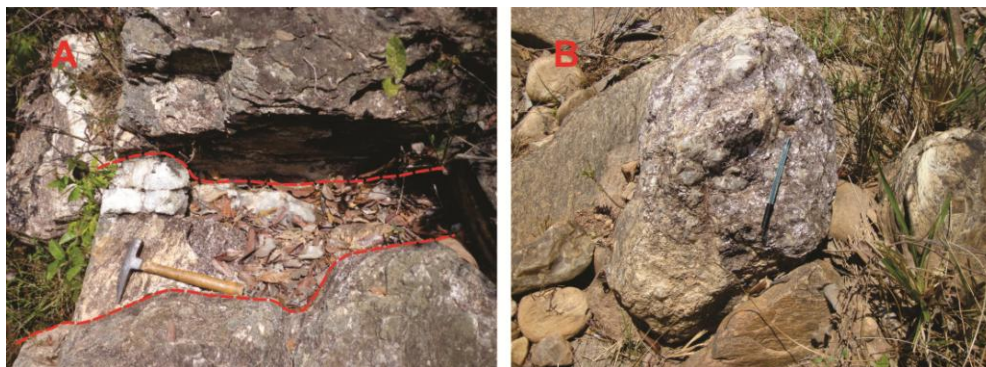


Figura 3. Prancha apresentando, A. Veio pegmatítico encaixado em xisto milonítico na área do Campo do Boa. B. Detalhe do bolsão de lepidolita no corpo.

GEOLOGIA E MINERALOGIA DOS DEPÓSITOS

Três principais áreas portadoras de depósitos com titanita-epidoto semelhantes foram reconhecidas nos entornos da cidade de Capelinha: Campo do Boa, Fanadinho e Bananal-Glucínio. Essa última localidade é de descoberta mais recente (2015), e apesar de material proveniente de lá estar disponível no mercado, tal área não foi visitada.

Área do Campo do Boa

Segundo Cassedanne e Cassedanne (1971) esse depósito foi descoberto em 1966, ao acaso, quando se achou um veio contendo titanita muito bem cristalizada, inicialmente confundida com brazilianita. Ainda atualmente, muitos garimpeiros locais tratam o mineral como “brasilionita”, e mesmo no Projeto Espinhaço isso foi erroneamente aceito (Baars et al., 1996, 1997; Guimarães et al., 1996; Guimarães e Grossi-Sad, 1997). Na verdade, o Campo do Boa é uma área mais extensa, com cerca de 5 km alongada na direção W-E, onde ocorrem dezenas de veios mineralizados (Figura 4A). A zona de garimpo principal, na atualidade, possui coordenadas UTM-GPS 749850-900E/8056430-450N, estando localizada entre as cotas 765-775 m (Figura 1).

Nessa região, ocorrem quartzitos finos a médios, de atitudes de acamamento em torno de N50-55°E/30-35°NW, que são capeados por rochas metavulcânicas básicas, xistosas, com atitudes de foliação semelhantes. Muitas vezes a base das galerias é dada pelos quartzitos. Estas consistem em uma série de pequenas escavações longas e estreitas (Figura 4B), muitas desabadas, além de poços inacessíveis, que exploram por garimpagem veios lenticulares de quartzo alinhados aproximadamente na direção N70°E, ou seja, subpararelos à foliação, encaixados nas rochas metabásicas com mergulhos baixos para norte. Tais veios possuem espessuras variáveis até cerca de 50 cm. Corpos lenticulares ou em forma de “buchos” também são frequentes (Figura 4C-D).

Nos veios feldspáticos, a albita forma agregados bem cristalizados, decimétricos, muito apreciados como amostras de coleção. O quartzo, mais raro, é mal cristalizado, em geral hialino e de porte decimétrico, ocorrendo irregularmente disperso. Eles podem conter ainda cristais de epidoto, titanita e/ou turmalina, isolados ou em grupos, por vezes sobre uma base comum correspondendo a fragmentos de epidoto englobados no quartzo. As drusas de

quartzo são atapetadas por epidoto e/ou titanita, e as cavidades, de dimensões decimétricas, são revestidas de cristais de albita, associados ou não a algum dos minerais precedentes.



Figura 4. Prancha apresentando, A. Visão geral da área do Campo do Boa, com diversas galerias de garimpagem em plena operação. B. Visão de detalhe de um desses túneis (“Serviço do Vilmar”). C. Rocha metabásica alterada com “lente” de quartzo e feldspato alterado, mostrando crescimento de epidoto nas bordas. D. “Bucho” de quartzo mal cristalizado e feldspato alterado, considerado guia para a detecção da mineralização.

Nas drusas, os cristais de titanita apresentam-se de maneira desordenada, em geral até 2-3 cm (eixo “c”) e algumas vezes multicentimétricos, com alguns raríssimos indivíduos superiores a 10 cm. Cassedanne e Cassedanne (1971) descreveram à época o maior deles medindo 12 x 4 x 5 cm. Eles são transparentes, a coloração é sempre verde amarelada e o brilho resinoso. Certas faces podem ser corroídas ou estriadas, e as fraturas internas são frequentes; esta última característica explica a raridade das gemas lapidáveis de maior porte. Cristais únicos são pouco frequentes; tais autores descrevem dois tipos de geminação: de contato (frequente) segundo o plano (100) e de penetração cruciforme, com o plano da macla paralelo a (010), ocorrendo ainda dupla macla de contato e de penetração dos tipos relacionados.

Duas lâminas delgadas permitiram caracterizar petrograficamente a rocha encaixante na área do Campo do Boa. A primeira amostra (CB-01) apresenta coloração cinza esverdeada e granulação muito fina. Ao microscópio (Figura 5A-B), é possível identificar uma textura granoblástica formada por minerais xenoblásticos equigranulares; a maior parte desta rocha é composta por epidoto de granulação fina. Há ocorrência de minerais opacos, quartzo, titanita de granulação bem fina e actinolita, além de um veio milimétrico de quartzo ao longo da rocha onde é possível observar dois tipos de quartzo, um microcristalino ao centro do veio e um quartzo recristalizado nas bordas do mesmo. Tal rocha foi classificada como um epidosito.

A outra amostra (CB-02) apresenta coloração verde, com grãos finos de albita, e grãos grossos de titanita e epidoto, sendo resultantes de uma cristalização secundária. Na

observação ao microscópio (Figura 5C-D), também é possível identificar sua textura granoblástica constituída por minerais xenoblásticos inequigranulares. A maior parte da rocha é formada por quartzo e albita de granulação média, além de epidoto de granulação grossa, também ocorrendo titanita de granulação grossa. Nesta última foto é possível observar que titanita e epidoto são minerais de relevo alto, enquanto quartzo e albita são minerais de relevo baixo; eles só são possíveis de serem bem visualizados com nicóis cruzados. Considerando que a quantidade de quartzo é expressiva, porém proveniente de uma fonte secundária (tal quantidade é incompatível com a mineralogia original da rocha) e portanto não ser incluído em sua classificação, ela pode ser definida simplesmente como um albita epidosito.

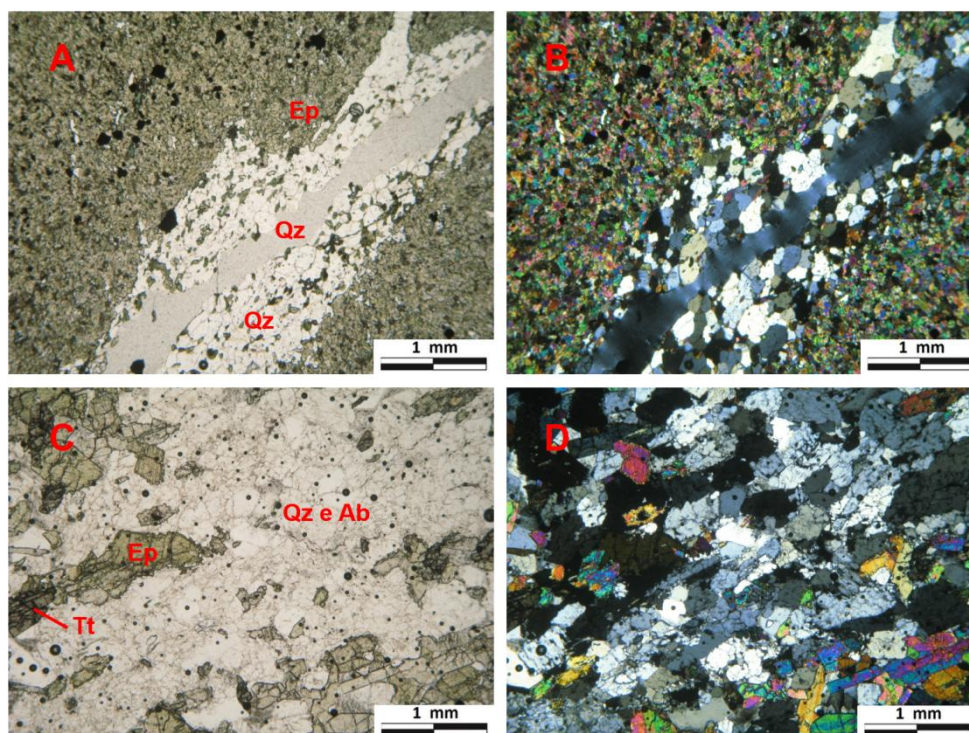


Figura 5. Fotomicrografias das amostras CB-01 e CB-02 do depósito do Campo do Boa com ênfase em suas assembleias mineralógicas principais. A e B: Granulação fina da rocha (CB-01) e detalhe do veio milimétrico de quartzo. C e D: Textura granoblástica da rocha (CB-02). Minerais: Qz – quartzo, Ab – albita, Ep – epidoto, Tt – titanita (A-C com nicóis descruzados e B-D com nicóis cruzados).

Área do Fanadinho

A área mineralizada do Fanadinho é de descoberta mais recente, do início da década de 1990, localizando-se nos arredores da junção do Ribeirão Fanadinho com o Rio Fanado (Figura 6A). O “Serviço do Adão”, em plena produção, corresponde atualmente a uma permissão de lavra garimpeira (PLG) do DNPM, de coordenadas GPS-UTM 770920E/8048320N, 710-30 m (Figura 6B-C). A exploração de titanita nessa área foi previamente citada, sem maiores detalhes, em Guimarães e Grossi-Sad (1997).

Para a descrição petrográfica das rochas portadoras da mineralização de titanita e epidoto no Fanadinho, foram também confeccionadas duas lâminas delgadas das amostras identificadas como FA-01 e FA-02. A primeira amostra apresenta coloração acinzentada, com granulação fina e foliação bem marcada. Ao microscópio, pode-se identificar uma textura lepidoblástica formada por uma matriz com minerais xenoblásticos inequigranulares (Figura 7A-B). A maior parte da rocha é composta por epidoto e prismas mais grossos de actinolita.

Há ainda ocorrência de titanita, quartzo e minerais opacos com granulação fina, sendo possível notar a foliação superimposta através da orientação dos grãos dos minerais alongados. Tal rocha foi classificada como um epidoto-actinolita-quartzo xisto.

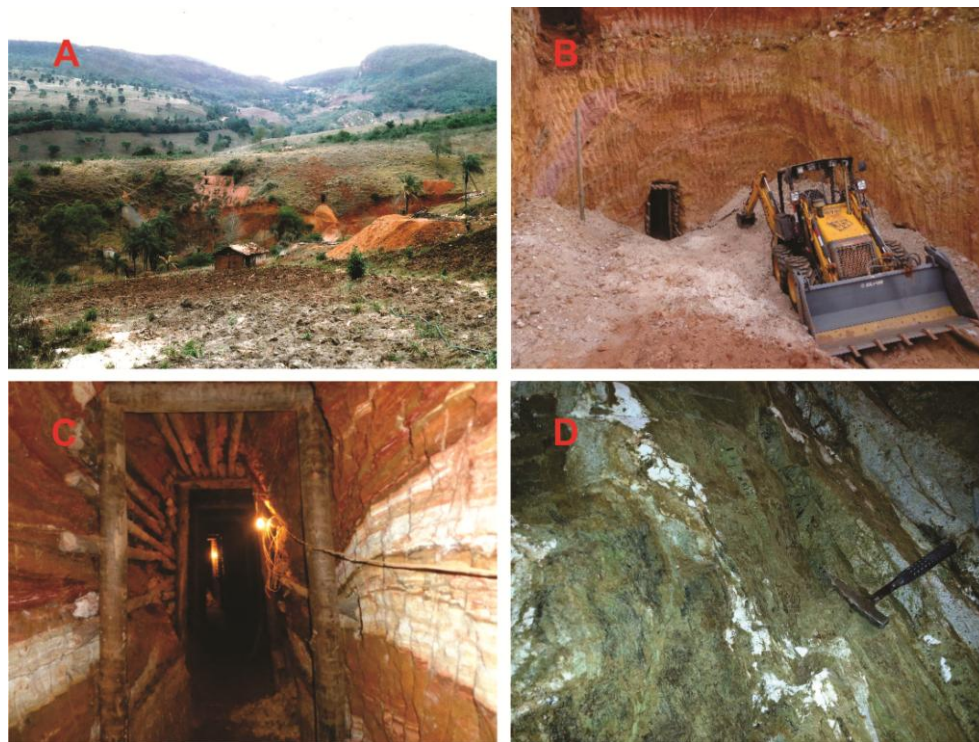


Figura 6. Prancha apresentando, A. Vista geral da área do Fanadinho, com diversos serviços em operação na década de 1990. B. Entrada da galeria do “Serviço do Adão”, em plena produção atual. C. Vista interna desta galeria, as porções brancas laterais correspondem a zonas mais ricas em caolim, consideradas guias da mineralização. D. Detalhe destes veios caulinizados cortando a rocha metabásica.

A segunda amostra (FA-02) apresenta coloração esverdeada e grãos grossos de titanita e epidoto. Em termos microscópicos (Figura 7C-D), identifica-se uma textura granoblástica formada por minerais xenoblásticos inequigranulares. A maior parte desta rocha é composta por quartzo, albita e epidoto de granulação grossa. Também há ocorrência de grãos grossos de titanita, além de minerais opacos e um mineral de granulação fina com clivagens abertas formando pequenos livros; acredita-se que tal mineral possa ser stilplomelano ou mesmo uma clorita expansiva, tipo vermiculita, mas para confirmação seria necessária análise de microsonda eletrônica.

Os protólitos dessas rochas são, sem dúvidas, rochas básicas formadas essencialmente por piroxênio, geralmente clinopiroxênio (augita-pigeonita) e um plagioclásio cálcico (geralmente labradorita), submetidos a duas fases de alteração secundária (evidências do metamorfismo regional não foram obtidas). A primeira fase foi responsável por uma alteração do tipo deutérica, na qual a rocha é alterada tardiamente por um excesso de fluidos originados do próprio magmatismo. Neste caso, ocorreu a saussuritização generalizada do plagioclásio, se transformando em albita e epidoto; o piroxênio sofreu um processo de uralitização transformando-se em anfibólio e, na sequência da hidratação, em biotita e clorita.

Quando existe CO_2 no sistema, o excesso de cálcio oriundo do plagioclásio dá origem à calcita, o que parece estar ausente no presente caso. Por conseguinte, como há titânio

liberado pela hidratação da ilmenita, sempre presente em rochas básicas, o excesso de Ca em presença de sílica, disponível devido à alteração do piroxênio para anfibólio, permite-se a cristalização da titanita. Ocorreu ainda um outro evento que não possui relação com assembleia mineral original ou secundária das rochas, tratando-se de um hidrotermalismo tardio associado à uma fase de deformação que promoveu uma acentuada foliação e propiciou a abertura de *tension-gashes* onde as fases minerais presentes na primeira fase foram remobilizadas e recrystalizadas.

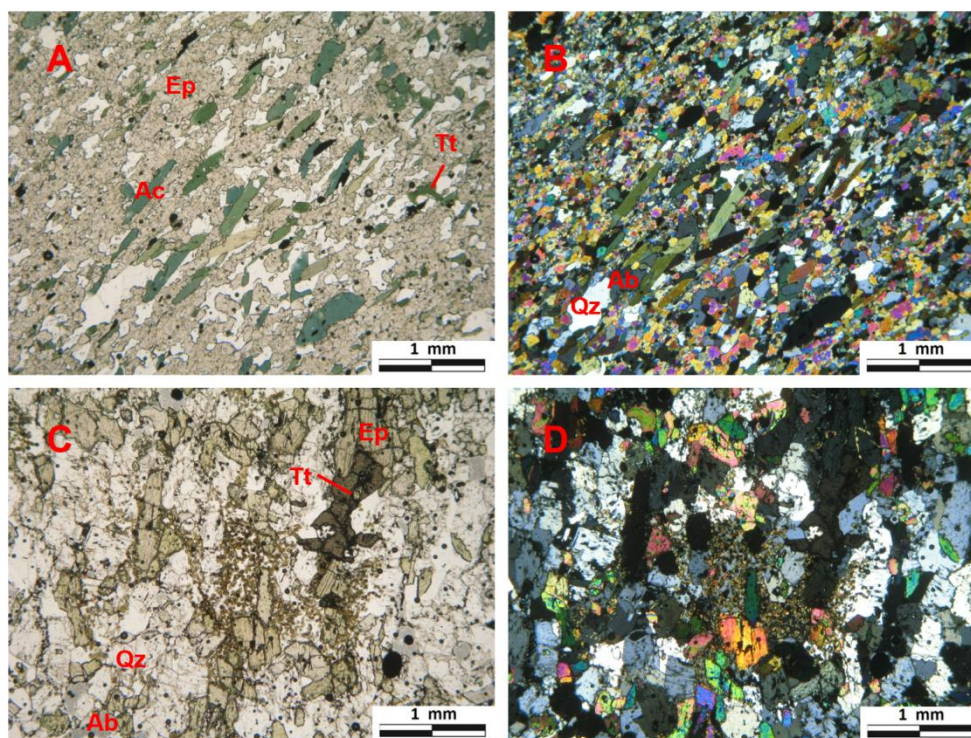


Figura 7. Fotomicrografias das amostras FA-01 e FA-02 do depósito do Fanadinho com ênfase em suas assembleias mineralógicas principais. A e B: Textura lepidoblástica da rocha, composta majoritariamente por epidoto e actinolita (amostra FA-01). C e D: Textura granoblástica da rocha (amostra FA-02). Minerais: Qz – quartzo, Ab – albita, Ep – epidoto, Tt – titanita, Ac – actinolita (A-C com nicóis descruzados e B-D com nicóis cruzados).

Os depósitos da área do Fanadinho apresentam certas diferenças mineralógicas em relação aos do Campo do Boa. Embora a expressão dos veios seja semelhante, entre alguns decímetros a alguns metros (um corpo irregular com pelo menos 4 m de espessura máxima, em lavra, foi verificado), ressaltam-se algumas particularidades. Nesta localidade, tais veios encontram-se fortemente caulinizados, e a existência de albita é mais rara no corpo principal dos mesmos, com quartzo quase ausente. Nas cavidades mineralizadas em geral como “buchos”, eles se compõem por albita branca pouco desenvolvida associada à titanita e/ou ortoclásio adulária róseo claro (Figura 8A-B), em geral atapetados de cristais de epidoto e/ou titanita tardios (Figura 8C-D). Nessa área o epidoto é muito mais abundante que no Campo do Boa, e drusas grandes de titanita, multicentimétricas, associadas ou não a epidoto, também foram observadas, algumas raras vezes com actinolita, ilmenita ou apatita associadas (Figura 8D-E-F).

GEOQUÍMICA DA ROCHA ENCAIXANTE

Três amostras da rocha encaixante da mineralização foram submetidas a análises geoquímicas para cada um dos locais enfocados (Campo do Boa e Fanadinho), visando seus elementos maiores e menores/traços. Tais análises foram obtidas pelo método ICP-MS no laboratório da SGS-GEOSOL, em Vespasiano-MG (Tabelas 1 e 2). Estudo geoquímico anterior sobre a rocha em questão foi também efetuado por Castro (2014), o qual, com base no diagrama clássico TAS (*Total Alkalies versus Silica*) para elementos maiores, concluiu que os protólitos seriam basalto, andesito basáltico e picrobasalto (com base no diagrama de Le Maitre, 1989), concluindo assim por um ambiente vulcânico continental intraplaca para tal magmatismo.

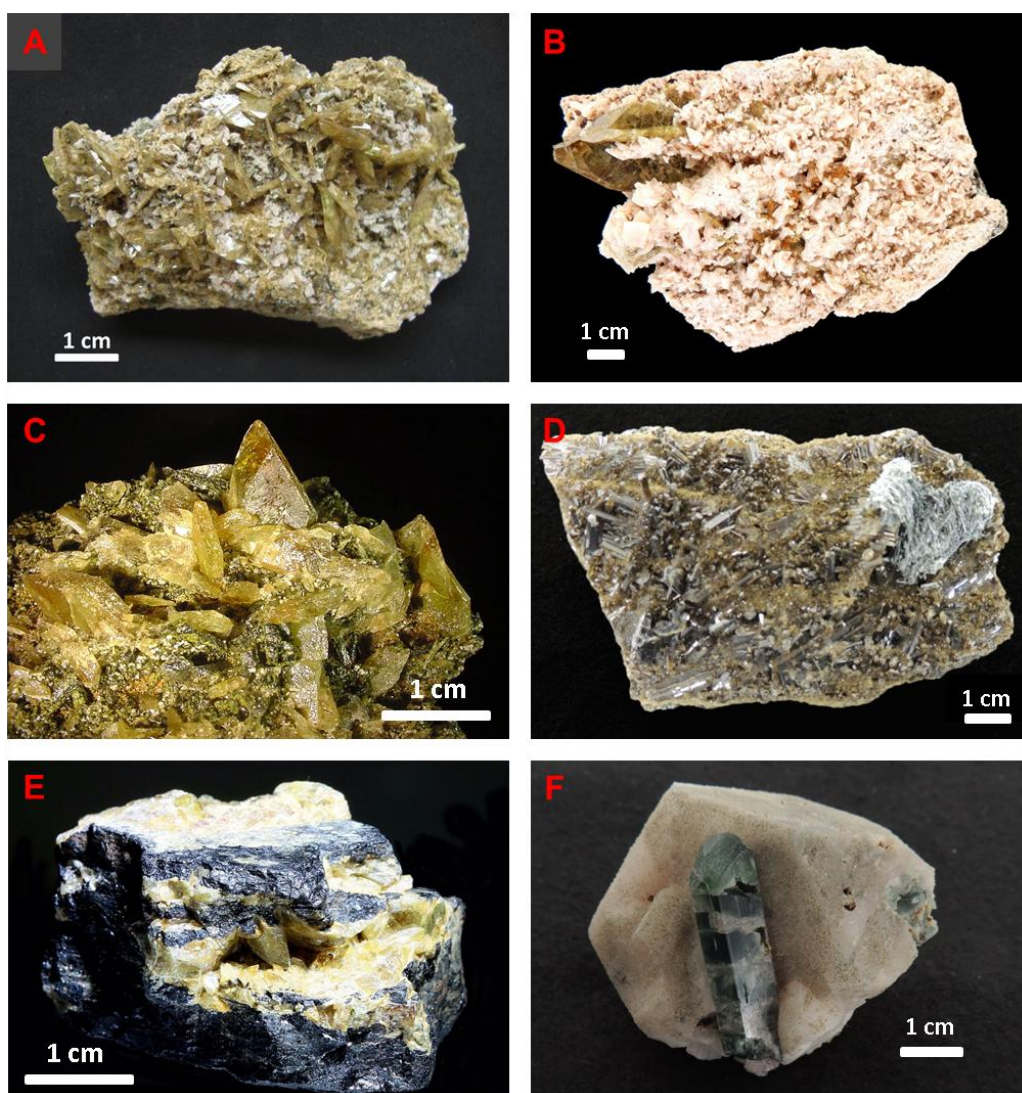


Figura 8. Amostras minerais representativas da região do Fanadinho. A. Drusa de titanita sobre albita branca. B. Grande cristal maclado de titanita sobre ortoclásio adulária. C. Drusa compacta de titanita praticamente pura. D. Drusa de epidoto na rocha encaixante (epidosito), mostrando acima (à direita) outra drusa, sobreposta, de actinolita provavelmente de uma geração tardia. E. Cavidade rica em titanita dentro de agregado maciço de ilmenita. F. Cristal verde de apatita sobre albita também cristalizada (fotos e amostras dos autores).

Tabela 1. Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos maiores nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG; dados em % em peso; todo Fe como Fe³⁺).

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PF	Total
1-CB	51,00	1,30	14,15	11,30	0,17	6,10	12,45	1,50	0,29	0,15	1,23	99,64
2-CB	56,25	1,32	13,30	11,15	0,23	4,00	10,96	0,95	0,46	0,16	1,10	99,86
3-CB	47,78	1,57	15,06	11,64	0,17	8,48	10,15	2,41	0,29	0,18	1,95	99,68
4-FA	44,08	2,79	16,52	13,23	0,17	2,80	17,46	0,53	0,09	0,44	1,55	99,66
5-FA	50,13	2,88	13,87	14,66	0,20	4,83	8,29	2,66	0,16	0,36	1,70	99,74
6-FA	48,36	3,19	14,02	15,05	0,20	4,75	9,63	1,07	0,25	0,38	2,80	99,70
Média	49,60	2,17	14,49	12,84	0,19	5,16	11,49	1,52	0,25	0,28	1,72	99,71

Entretanto, tendo em vista que as rochas em questão apresentam metamorfismo, além de alteração hidrotermal (conforme a assembleia mineralógica identificada na petrografia), processos que provavelmente modificaram sua composição original, preferiu-se utilizar o diagrama de Winchester e Floyd (1977), que utiliza elementos traços de baixa mobilidade geoquímica (Figura 9). Para estes autores, a abundância e a distribuição de alguns elementos menores ou traços podem ser utilizadas para a classificação de produtos da série magmática alcalina a subalcalina, de modo similar ao que é feito para os elementos maiores. De tal modo, a relação Zr/Ti seria equivalente ao comportamento da sílica, enquanto a relação Nb/Y corresponderia aos álcalis (Na₂O+K₂O), possibilitando, por via indireta, a reconstrução do diagrama TAS (Figura 8). Segundo esse diagrama, todas as amostras analisadas foram classificadas como álcali-basaltos. Ressalta-se, ainda, que tal magmatismo é substancialmente rico em titânio (média de 2,17% TiO₂), de modo especial na área do Fanadinho.

Tabela 2. Análises geoquímicas por ICP-MS de elementos menores e traços nas rochas metabásicas da Formação Capelinha (Lab. SGS-GEOSOL, Vespasiano-MG; dados em ppm).

Amostra	F	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Y	Ba	Zr	Nb	Sr
1-CB	380	440	155	59	77	67	88	11	129	89,4	8,7	289
2-CB	180	260	142	47	90	89	99	24	192	184,4	62,7	403
3-CB	590	292	101	72	110	56	47	24	66	167,3	22,5	888
4-FA	300	284	183	45	76	83	92	24	200	184,4	22,7	385
5-FA	363	350	142	61	72	44	74	20	79	153,1	18,3	545
6-FA	325	336	151	51	94	66	69	29	97	219,8	29,2	701
Média	356	327	146	56	88	68	78	22	128	166,4	27,4	535

MINERALOQUÍMICA DO FELDSPATO E DA TITANITA

Duas amostras de rochas intimamente ligadas aos corpos mineralizados (uma classificada em seção delgada como epidosito, e outra macroscopicamente como uma rocha brechoide quartzosa complexa) presentes em um “bucha” da área do Campo do Boa, além de duas amostras de feldspato (um branco e outro róseo) associados à mineralização de titanita-epidoto do Fanadinho, foram analisadas por difração (DRX) e fluorescência (FRX) de raios X, visando caracterizar suas constituições gerais mineralógicas e químicas (Lab. de Raios X do DEMIN, Esc. de Engenharia da UFMG). Os dados obtidos a partir dessas análises são apresentados na Tabela 3.

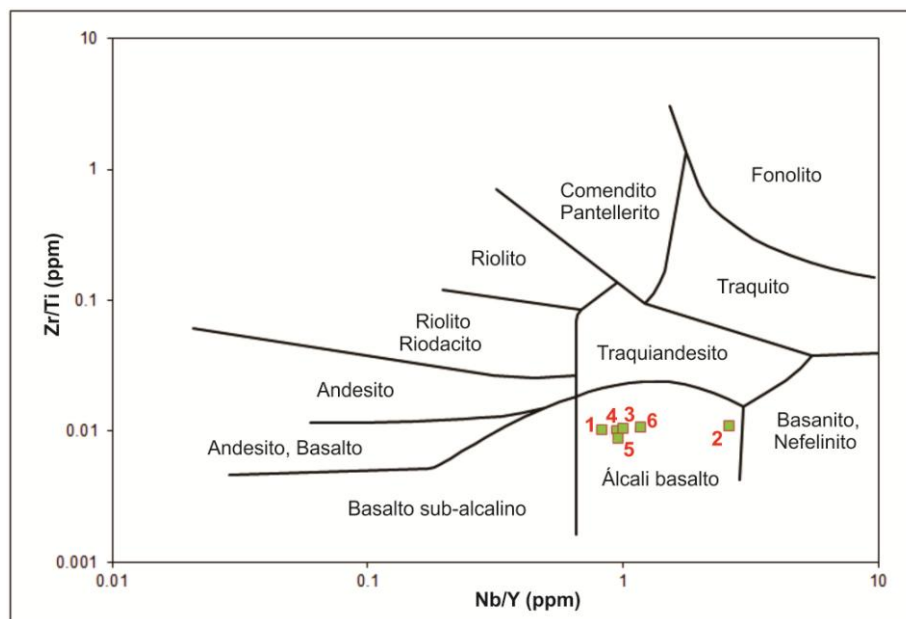


Figura 9. Classificação das rochas metabásicas da região enfocada, baseado no diagrama de Winchester e Floyd (1977) para rochas vulcânicas utilizando elementos imóveis.

Como pode-se observar nesta tabela, as duas primeiras rochas são formadas basicamente por epidoto, além de quartzo, caulinita e manganogrunerita (DRX). O feldspato branco do Fanadinho foi identificado como albita, e o róseo como ortoclásio adulária, associados a epidoto, quartzo e muscovita (DRX). O fato da albita ainda predominar deve-se provavelmente ao fato de que a adulária a cobre em crostas delgadas, dificultando sua total separação. Apesar de titanita ou ilmenita não serem identificados pela difração de raios X, é possível observar que foi detectada a presença anômala de titânio em três das quatro amostras analisadas (FRX), denotando o meio rico neste elemento.

Tabela 3. Resultados das análises por difração e fluorescência de raios X para amostras selecionadas dos depósitos de Capelinha (significado dos valores de FRX: abundante >31%; médio 15-30%; médio-baixo 5-14%; baixo 0,1-4%; traço < 0,1% - estabelecido pelo Lab. Raios X do DEMIN, Esc. de Engenharia da UFMG).

Local/ material	Campo do Boa		Fanadinho	
	Epidosito	Rocha brechoide	Feldspato branco	Feldspato róseo
Minerais identificados (Difração de raios X)	Epidoto (abundante) Manganogrunerita (traço)	Epidoto (abundante) Quartzo (médio) Caulinita (traço)	Albita (abundante) Epidoto (baixo) Quartzo (baixo)	Albita (abundante) Adulária (médio) Epidoto (médio-baixo) Muscovita (traço)
Elementos químicos (Fluorescência de raios X)	Si, Al, O (altos) Fe, Ca (médios) Mg, Mn, Sr (baixos) Ti, S, P (traços)	Si, Al, O (altos) Fe, Ca (médios) Sr, Mg, Mn (baixos) Ti, V, S, P (traços)	Si, Al, O (altos) Na (médio) Mg, Fe, Ca (baixos) P, S, Cu, Nb, Ta (traços)	Si, Al, O (altos) Na (médio) K, Fe, Mg, Ti, Ca (baixos) Zr, P, Rb, Sr (traços)

As titanitas de Capelinha foram também analisadas com microsonda eletrônica, em aparelho JEOL-JXA8900R nos modos EDS (semiquantitativo) e WDS (quantitativo), do Centro de Microscopia da UFMG (Tabela 4). Os padrões utilizados foram: Al_2O_3 – Al_2O_3 , FeO – magnetita, CaO – anortita, SiO_2 – forsterita, TiO_2 – rutilo, MgO – forsterita e Cr_2O_3 – Cr_2O_3 . Para tais análises, utilizaram-se cinco amostras de titanita de cada um dos depósitos enfocados (Fanadinho e Campo do Boa). Além disso, foram analisadas amostras do novo local produtor na região, designado de “Bananal-Glucínio” (ele encontra-se fora da área

apresentada na Figura 1), e ainda de um outro depósito brasileiro aparentemente similar, situado em Xambioá (norte do Estado do Tocantins).

Tabela 4. Análises com microsonda eletrônica de amostras representativas de titanita dos depósitos de Capelinha (CB e FA), Bananal-Glucínio (BG) e Xambioá (XA). CB - Campo do Boa (média de 5 amostras), FA - Fanadinho (média de 5 amostras), BG - Bananal/Glucínio (média de 12 amostras), XA - Xambioá-TO (média de 15 amostras) (dados em % em peso; todo ferro como Fe^{2+} ; (*) Média de três análises por TTG; Nd, não determinado).

Am.	Al_2O_3	FeO	CaO	SiO_2	TiO_2	MgO	Cr_2O_3	H_2O^*	Total
CB	1,13	0,55	28,54	30,06	38,59	Nd	0,01	Nd	98,88
FA	1,12	0,52	28,40	29,94	38,59	Nd	0,02	1,10	99,69
BG	1,38	0,74	29,57	30,80	36,87	0,00	0,06	Nd	99,36
XA	0,93	0,64	29,43	30,89	37,64	0,01	0,03	Nd	99,53
IDEAL	-	-	28,60	30,60	40,80	-	-	-	100,00

Ressalta-se de início que os valores gerais obtidos nas análises das amostras do Campo do Boa e Fanadinho apresentam similaridades muito fortes, denotando a provável gênese similar do mineral na região de Capelinha. Em relação à nova localidade produtora (Bananal-Glucínio), as diferenças químicas também podem ser consideradas insignificantes, bem como ao depósito de Xambioá (TO). Estes dois últimos, inclusive, apresentam semelhanças ainda mais fortes entre si. Os valores de Al_2O_3 e FeO são apreciáveis nesses locais, sendo que o ferro provavelmente se relaciona com a tonalidade amarela-amarronzada das amostras (conforme Vassilikou-Dova e Lehmann, 1998). Embora a titanita tenha uma composição química relativamente simples, $\text{CaTiO}(\text{SiO}_4)$, Deer et al. (1992) demonstraram que as substituições químicas são comuns, de modo que $(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}) + (\text{F}, \text{OH})^- = \text{Ti}^{4+} + \text{O}^{2-}$, explicando assim a presença significativa de Al, Fe e H_2O nas análises.

INCLUSÕES FLUIDAS

Inclusões fluidas foram estudadas sobre uma amostra de quartzo hialino com titanita da área do Campo do Boa. Inicialmente tentou-se caracterizar tais inclusões na própria titanita, mas elas não puderam ser submetidas ao estudo de microtermometria, pois apresentavam dimensões inferiores a 5 μm , limitando as análises ao quartzo associado. Em uma seção bipolida deste mineral, conduziram-se análises microtermométricas sobre as inclusões associadas a um mesmo domínio do cristal, em platina automática Linkam THMSG600 com um controlador de temperatura TMS93 – no Laboratório de Metalogenia do IGC-UFMG. Durante o estudo foram conduzidos ensaios de resfriamento (até -140°C) e de aquecimento (até $\sim 450^\circ\text{C}$). A platina foi calibrada com inclusões sintéticas de CO_2 e H_2O fornecidas pela Linkam. A precisão das medidas é de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ para temperaturas negativas e de $\pm 1^\circ\text{C}$ para temperaturas entre 0 - 450°C (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados das análises de microtermometria em amostra de quartzo hialino associado à titanita do Campo do Boa (Capelinha). (*) 1 - Inclusão aquosa, pseudosecundária, com razão líquido vapor de 5 a 20 e formato arredondado, por vezes irregular.

Veio	Grupo	n	Tipo Inclusão(*)	Fases	% vapor	$T_{\text{eutética}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{Fusão Final do Gelo}} (^\circ\text{C})$	$T_{\text{Homogeneização}} (^\circ\text{C})$	Salinidade (% NaCl)	Densidade (g/cm^3)
1	1	1	1	L-V	5	-22,0	-0,7	-	1,16	-
1	2	20	1	L-V	$17,5 \pm 4,4$	-22,0	$-0,6 \pm 0,2$	$306,4 \pm 26,4$	$0,94 \pm 0,36$	$0,69 \pm 0,05$
1	3	15	1	L-V	$10,7 \pm 2,6$	-24,1	$-0,2 \pm 0,1$	$286,1 \pm 24,0$	$0,40 \pm 0,16$	$0,72 \pm 0,06$
1	4	3	1	L-V	$15,2 \pm 5,6$	-24,3	$-0,4 \pm 0,3$	375,0	1,16	0,51
1	5	2	1	L-V	10	-23,2	$-0,2 \pm 0,4$	-	0,83	-
1	6	1	1	L-V	10	-	-1,7	-	2,79	-
1	7	4	1	L-V	$7,5 \pm 2,8$	-	-0,3	$271,0 \pm 20,1$	0,50	$0,76 \pm 0,04$

Através das temperaturas eutéticas caracterizadas na Tabela 5, variando entre -22°C e $-24,3^{\circ}\text{C}$, foi possível concluir que o Na^{+} é o cátion mais abundante nas inclusões fluidas. Para determinação da salinidade e da densidade das mesmas, foi utilizado o programa MacFlinCor (Brown e Hagemann, 1995) e a equação de estado para o sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (Bodnar e Vityk, 1994). As temperaturas de fusão final do gelo foram usadas para a determinação das salinidades das inclusões, registrando valores de salinidade entre 0,40 e 2,79 % NaCl.

As densidades das inclusões foram calculadas através das temperaturas de homogeneização registradas durante o aquecimento da amostra e apresentaram valores variando de 0,51 a $0,76\text{ g/cm}^3$. Para alguns grupos analisados durante a microtermometria não foi possível determinar tais densidades, pois as mesmas sofreram decrepitação durante o aquecimento, impossibilitando o registro de suas temperaturas de homogeneização. As inclusões fluidas aquosas possuem baixa salinidade, confirmada pelas temperaturas de fusão final do gelo variando entre $-0,2^{\circ}\text{C}$ e $-1,7^{\circ}\text{C}$. Tais inclusões são pseudosecundárias com razão líquido/vapor variando de 5 a 20 e apresentando, em sua maioria, formato arredondado, ou por vezes irregular.

Conforme observado na fotomicrografia apresentada na figura 10A, é possível perceber a formação de várias trilhas de inclusões, enquanto na fotomicrografia 10B notam-se algumas inclusões que apresentam o formato *necking down* devido ao estrangulamento das mesmas, provavelmente ocorrido durante evento de deformação final do veio. Para estimar as temperaturas de aprisionamento de cada inclusão, foi utilizado o gráfico de isócoras gerado no programa MacFlinCor, que relaciona a temperatura de homogeneização medida durante as análises com as curvas de pressão. Este gráfico é usado para determinar a temperatura de correção que será somada à temperatura de homogeneização a fim de se obter a temperatura de aprisionamento no momento de formação das inclusões.

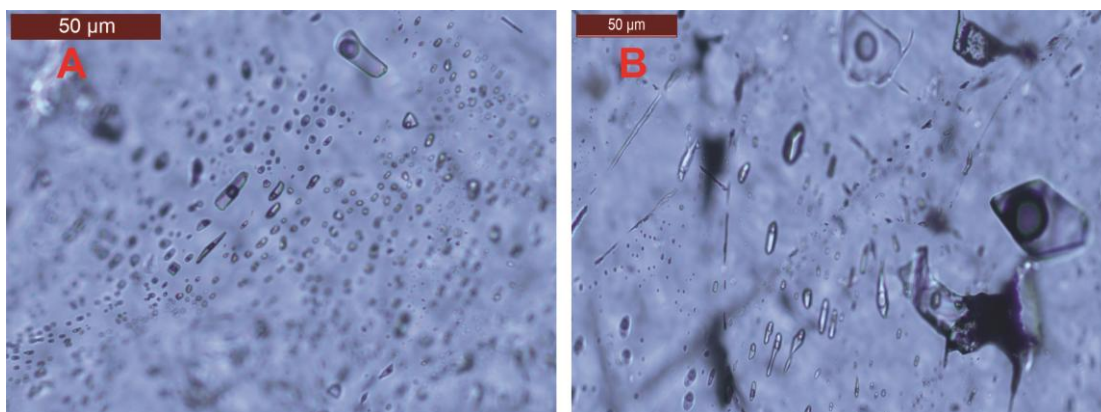


Figura 10. Fotomicrografias dos grupos de inclusões fluidas contidas em quartzo da região do Campo do Boa (Capelinha) A: Trilhas de inclusões típicas. B: Inclusões de formato *necking down*.

Como as condições de pressão dos fluidos hidrotermais no momento da formação das inclusões não são conhecidas, foram feitas medidas estimando-se pressões de 50, 100, 150 e 200 MPa. Na Tabela 6 apresentam-se os resultados da temperatura de aprisionamento para cada grupo de inclusões relacionando a pressão estimada no momento de sua formação. Analisando-se tais resultados pode concluir que: (1) A temperatura de homogeneização obtida no momento das análises representa o comportamento das inclusões fluidas quando não estão submetidas à pressão atmosférica, portanto a temperatura de aprisionamento será maior que este valor; (2) Também é possível observar que há um aumento de aproximadamente 50°C na

temperatura de aprisionamento estimada para cada aumento de 50 MPa na pressão; (3) A grande maioria dos dados indica uma temperatura de aprisionamento entre 300-450°C, condizentes com as condições metamórficas regionais de fácies anfibolito.

Tabela 6. Resultados de temperaturas de aprisionamento, em °C, relacionando cada grupo de inclusões analisado a um valor de pressão estimada.

Grupo	PRESSÃO ESTIMADA				
	Pressão Atmosférica	50 Mpa	100 Mpa	150 Mpa	200 Mpa
	T _{Homogeneização} (°C)	T _{Aprisionamento} (°C)			
1	-	-	-	-	-
2	306,4 ± 26,4	364,6 ± 36,6	409,6 ± 33,9	456,1 ± 34,6	503,6 ± 37,8
3	286,1 ± 24,0	334,0 ± 29,0	381,2 ± 31,1	426,8 ± 32,9	472,6 ± 34,7
4	375,0	446,0	500,0	554,0	605,0
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	271,0 ± 20,1	318,0 ± 23,1	362,7 ± 24,6	407,3 ± 26,1	452,0 ± 27,6

DISCUSSÃO SOBRE A GÊNESE DA MINERALIZAÇÃO

O único trabalho que se ateve com maior detalhe à gênese desses depósitos, embora enfocando somente o então explorado Campo do Boa, é o de Cassedanne e Cassedanne (1971). Entretanto, tal estudo abrangeu aspectos descritivos sobre a petrografia e a mineralogia desta localidade, não envolvendo questões de ordem genética. Correia-Neves et al. (1986) incluíram na Província Pegmatítica Oriental do Brasil toda a região compreendida nos entornos de Capelinha e, seguindo esse conceito, Lobato e Pedrosa-Soares (1993) designaram o “Campo de Capelinha”, inserindo-o no Distrito Pegmatítico de Araçuaí daquela província mineral, embora não tenham feito qualquer menção se os depósitos de titanita estariam ou não envolvidos nesse contexto.

No entanto, o Projeto Espinhaço, que levantou a região na escala 1:100.000, nas duas folhas que abrangem a área (Capelinha e Malacacheta) relacionaram tal mineralização a pegmatitos graníticos, uma vez que erroneamente a titanita foi confundida com brazilianita (respectivamente Baars et al., 1997; Guimarães e Grossi-Sad, 1997), um mineral típico de pegmatitos do leste de Minas Gerais. No entanto, nesses dois trabalhos, bem como nos demais anteriores, não foi descrito nenhum pegmatito de mineralogia clássica como os abundantemente expostos ao longo de toda a Província Oriental. Pegmatitos só foram caracterizados no estudo de Castro (2014), que os associou geneticamente à “Suíte Mangabeiras”, constituída por granitos pós-orogênicos ao Orógeno Araçuaí e pertencentes à suíte “G4” conforme as definições de Pedrosa-Soares et al. (2001, 2011).

As idades de sedimentação e do vulcanismo básico da Formação Capelinha, encaixante dos depósitos, foram obtidas pelo método U-Pb LA-ICP-MS em zircão, em torno de 970-960 Ma, com metamorfismo superimposto (U-Pb em titanita) ocorrendo por volta de 570 Ma (Castro, 2014). Entretanto, essa última idade é bastante assilar à da pegmatogênese regional associada à suíte granítica “G4”, desenvolvida preferencialmente entre 510-490 Ma (e.g., Pedrosa-Soares et al., 2001, 2011; Gonçalves et al., 2016) e também aos principais eventos hidrotermais, desenvolvidos ainda mais tardiamente durante o colapso final do Orógeno Araçuaí entre 500-480 Ma (e.g., Chauvet et al., 2001; Chaves et al., 2010, 2017; Cabral e Zeh, 2015).

Tendo em vista a presença de pegmatitos nas proximidades de umas das zonas mineralizadas, associados a magmatismo pós-orogênico (Castro, 2014), e com a descoberta de lepidolita na região, um mineral típico de pegmatitos a elementos raros, em geral altamente diferenciados (eg., London, 2008), demonstrou-se a existência de intrusão(ões) granítica(s) sub-aflorante(s), provavelmente a maiores profundezas. Esse evento “ácido”, porém, não

estaria relacionado com os depósitos essencialmente “básicos” dados pela presença de titanita, epidoto, ilmenita, actinolita, etc. No entanto, a presença dos xistos miloníticos, que poderiam ser tanto de rochas do embasamento (Grupo Guanhões) como da própria Formação Capelinha, indica a existência de uma zona de cisalhamento bastante próxima da área mineralizada.

A idade de colocação dos fluidos hidrotermais, por conseguinte, ainda não pode ser exatamente estabelecida. Entretanto, algumas considerações podem ser assumidas. O metamorfismo superimposto foi de fácies anfíbolito, o que implica em temperaturas da ordem de 350-450 °C (e.g., Miyashiro, 1973). Como tal faixa de temperatura é coincidente com as temperaturas de homogenização dadas pelo estudo das inclusões fluidas, em geral da ordem de 300-450 °C, significa que elas possivelmente se formaram em idade semelhante ao do processo metamórfico (± 570 Ma), provavelmente numa fase póstuma associada ao arrefecimento do mesmo.

CONCLUSÃO

O Brasil, particularmente o Estado de Minas Gerais, é um dos mais importantes fornecedores de minerais gemológicos, raros e de coleção, de todo mundo. Nesse contexto, os depósitos de titanita-epidoto de Capelinha se destacam por produzir peças de coleção e gemológicas únicas, das mais famosas em termos internacionais (Figura 8A-B-C). Paradoxalmente, porém, tais depósitos nunca haviam sido alvo de estudos particularizando sua gênese.

No presente trabalho, envolveram-se metodologias diversas para entender a evolução genética do processo mineralizante, abrangendo a petrografia e geoquímica da rocha hospedeira, difração e fluorescência de raios X de rochas e minerais associados, microsonda eletrônica da titanita, bem como inclusões fluidas. Tais estudos, integrados, permitiram concluir sob a seguinte evolução temporal dos processos atuantes:

1. Extrusão do vulcanismo basáltico, rico em titânio, intercalado aos sedimentos quartzosos da Formação Capelinha, base do Grupo Macaúbas na região homônima, entre 970-960 Ma;
2. Metamorfismo regional sob condições de fácies anfíbolito em 570 Ma, relacionado ao desenvolvimento do Orógeno Araçuai durante o Ciclo Brasileiro, com a presença de titanita metamórfica indicando um provável pré-enriquecimento em titânio;
3. Hidrotermalismo tardio, relacionado ao mesmo processo metamórfico, cujos fluidos residuais, talvez conectados ao desenvolvimento de zonas de cisalhamento, levaram à formação de veios hidrotermais ricos principalmente em titanita, epidoto, apatita e ilmenita na região.
4. Intrusão de rochas magmáticas graníticas, posteriores ao clímax da evolução do orógeno, pertencentes à suíte “G4” do magmatismo regional, datado no período entre 535-490 Ma, seguido de pegmatogênese regional, em 510-490 Ma, proveniente de fluidos emanados dessa fase magmática, sem relação genética com os depósitos estudados.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor (MLSCC) agradece ao CNPq pela concessão de Bolsa de Produtividade em Pesquisa. Ao Laboratório de Metalogenia do IGC-UFMG, nas figuras da Profa. Dra. Rosaline Figueiredo e Silva e do doutorando Sylvio Dutra Gomes, pelo acompanhamento e discussões sobre as análises de inclusões fluidas. Este trabalho integra parte da Dissertação de Mestrado do segundo autor (ELTJr.), que agradece ao Programa de Pós-Graduação em Geologia (IGC-UFMG) pela Bolsa de Pesquisa CAPES concedida.

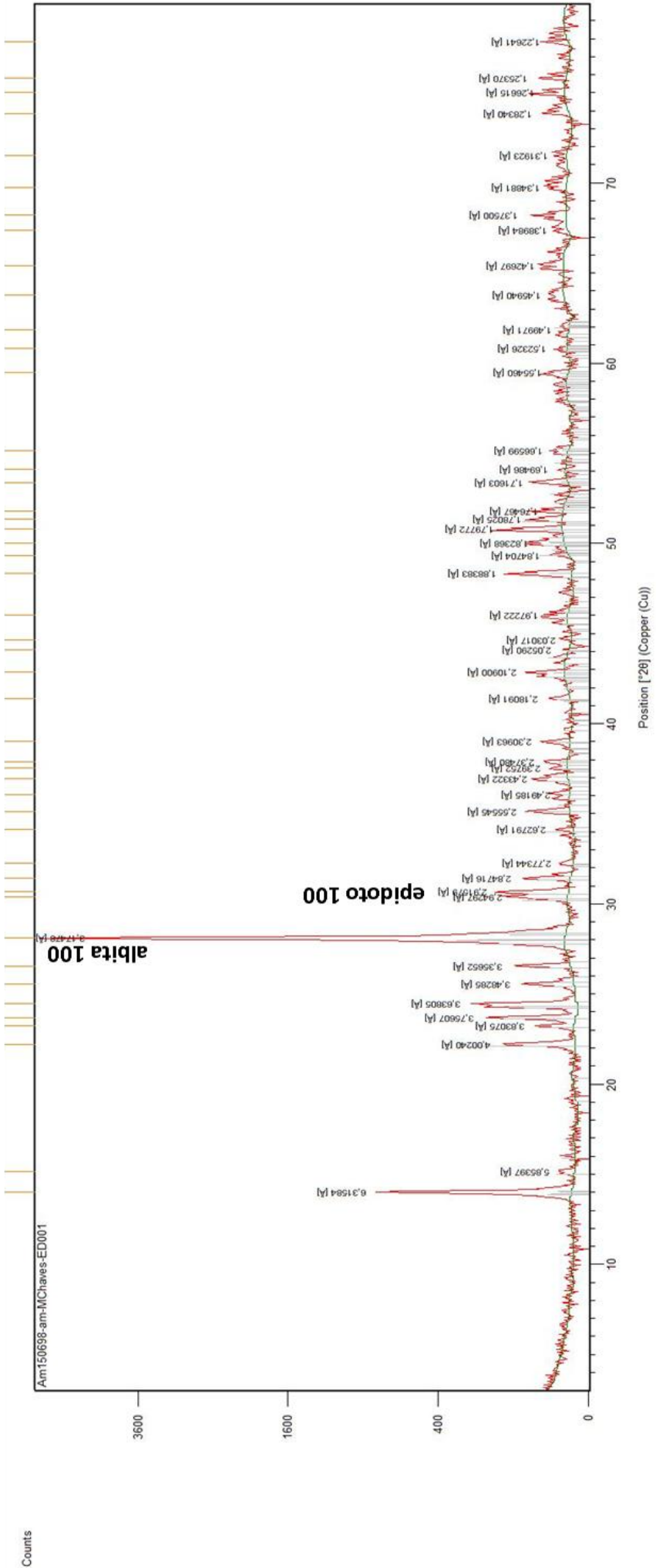
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

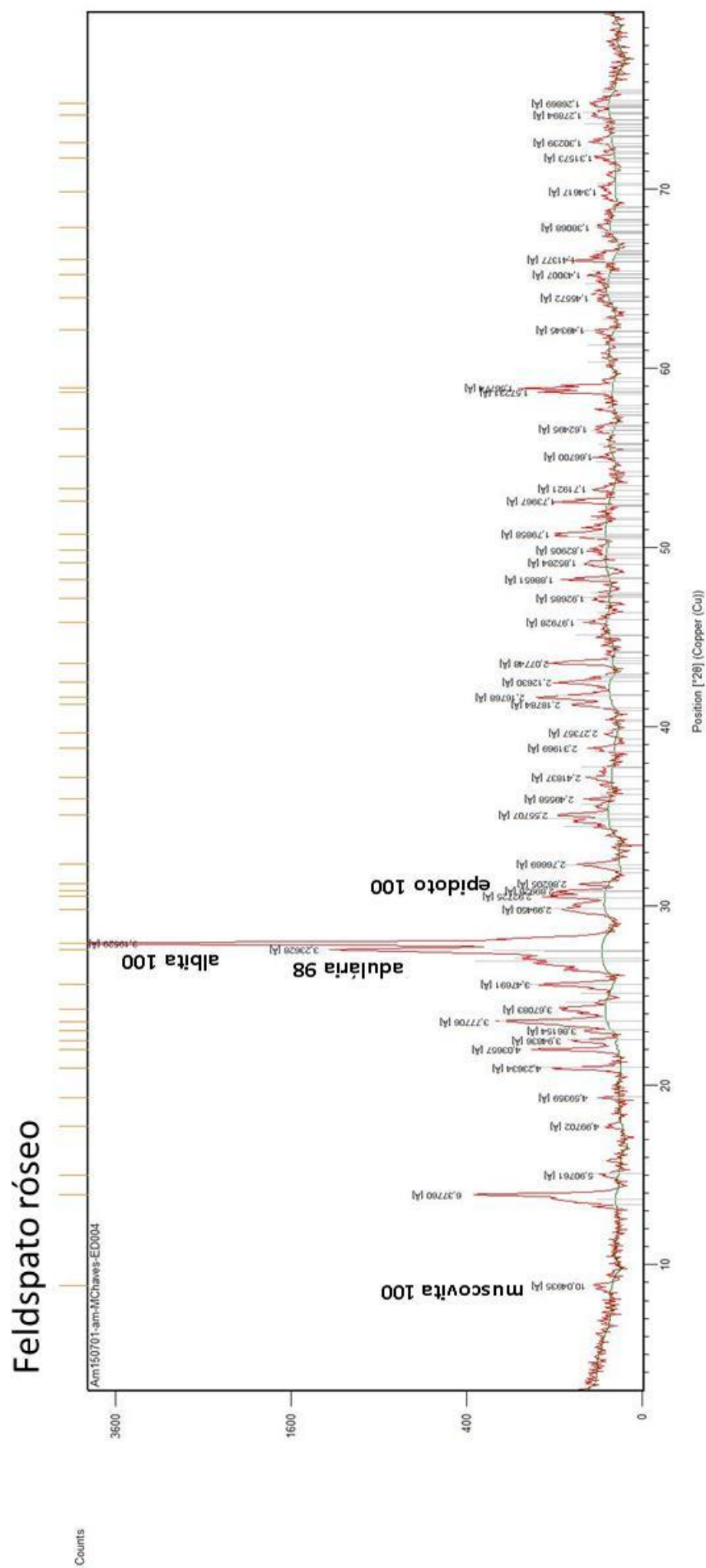
- Baars, F., Grossi-Sad, J. H., Motta, E., Pedrosa-Soares, A. C., Uhlein, A. (1996). *Mapa Geológico da Folha Capelinha, Minas Gerais*. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: Projeto Espinhaço, Convênio COMIG/IGC-UFGM.
- Baars, F. J., Grossi-Sad, J. H., Fonseca, E. (1997). Geologia da Folha de Capelinha. In: J. H. Grossi-Sad, L. M. Lobato, A. C., Pedrosa-Soares, B. S. Soares-Filho. *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. Belo Horizonte: COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais.
- Bodnar, R. J., Vitik, M. O. (1994). Interpretation of microthermometric data for NaCl-H₂O fluid inclusions. In: B. De Vivo, M. L. Frezzotti (Eds.), *Fluid inclusions in minerals: methods and applications* (v. 1, 117 - 131). Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Brown, P. E., Hagemann, S. G. (1995). The program MacFlinCor and its application to geobarometry in Archean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 3943-3952.
- Cabral A. R., Zeh A. 2015. Detrital zircon without detritus: a result of 496-Ma-old fluid-rock interaction during the gold-lode formation of Passagem, Minas Gerais, Brazil. *Lithos*, 212-215, 415-427.
- Cassedanne, J. P., Cassedanne, J. O. (1971). Note sur le gisement de sphène du Campo do Boa (Município de Capelinha – Estado de Minas Gerais). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 43, 399-405.
- Castro, M. P. (2014). *Caracterização geológica da Formação Capelinha como uma unidade basal do Grupo Macaúbas em sua área tipo, Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais). Ouro Preto: Departamento de Geologia, UFOP.
- Chauvet, A., Piantone, P., Barbanson, L., Nehlig, P., Pedroletti, I. (2001). Gold deposit formation during collapse tectonics: structural, mineralogical, geochronological, and fluid inclusion constraints in the Ouro Preto gold mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, 96, 25-48.
- Chaves, M. L. S. C., Brandão, P. R. G., Buhn, B. (2010). Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, geocronologia e implicações geológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 40, 506-515.
- Chaves, M. L. S. C., Buhn, B., Dias, C. H., Menezes Filho, L. A. D. (2017). Idades U-Pb em xenotímio-(Y) de um veio de quartzo com almeidaíta e parisita-(la), novos minerais encontrados na Serra do Espinhaço (Novo Horizonte, BA). *Geociências*, 36 (submetido).
- 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, 106-118.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. (1992). *Minerais Constituintes das Rochas*. Lisboa: Editora Fundação Calouste Gulbenkian (2ª ed.).
- Fontes, C. Q., Pereira, A. D. C., Netto, C., Pereira, F. S., Lima Junior, L. O., Costa, M. R. A., Baltazar, O. F., Silva, S. L.; Vieira, V. S., Ferrari, P. G., Ramalho, R. (1978). *Projeto Jequitinhonha*. Escala 1:250.000. Belo Horizonte: CPRM/DNPM, Relatório Final.
- Gonçalves, G. O., Lana, C., Scholz, R., Buick, I. S., Gerdes, A., Kamo, S. L., Corfu, F., Marinho, M. M., Chaves, A. O., Valeriano, C., Nalini Jr., H. A. (2016). An assessment of monazite from the Itambé pegmatite district for use as U–Pb isotope reference material for microanalysis and implications for the origin of the “Moacyr” monazite. *Chemical Geology*, 424, 30-50.
- Grossi-Sad, J. H., Motta, E., Baars, F. (1993). Formação Capelinha: uma nova entidade estratigráfica do Grupo Macaúbas. *VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 30-33. Belo Horizonte: SBG-Núcleo MG.

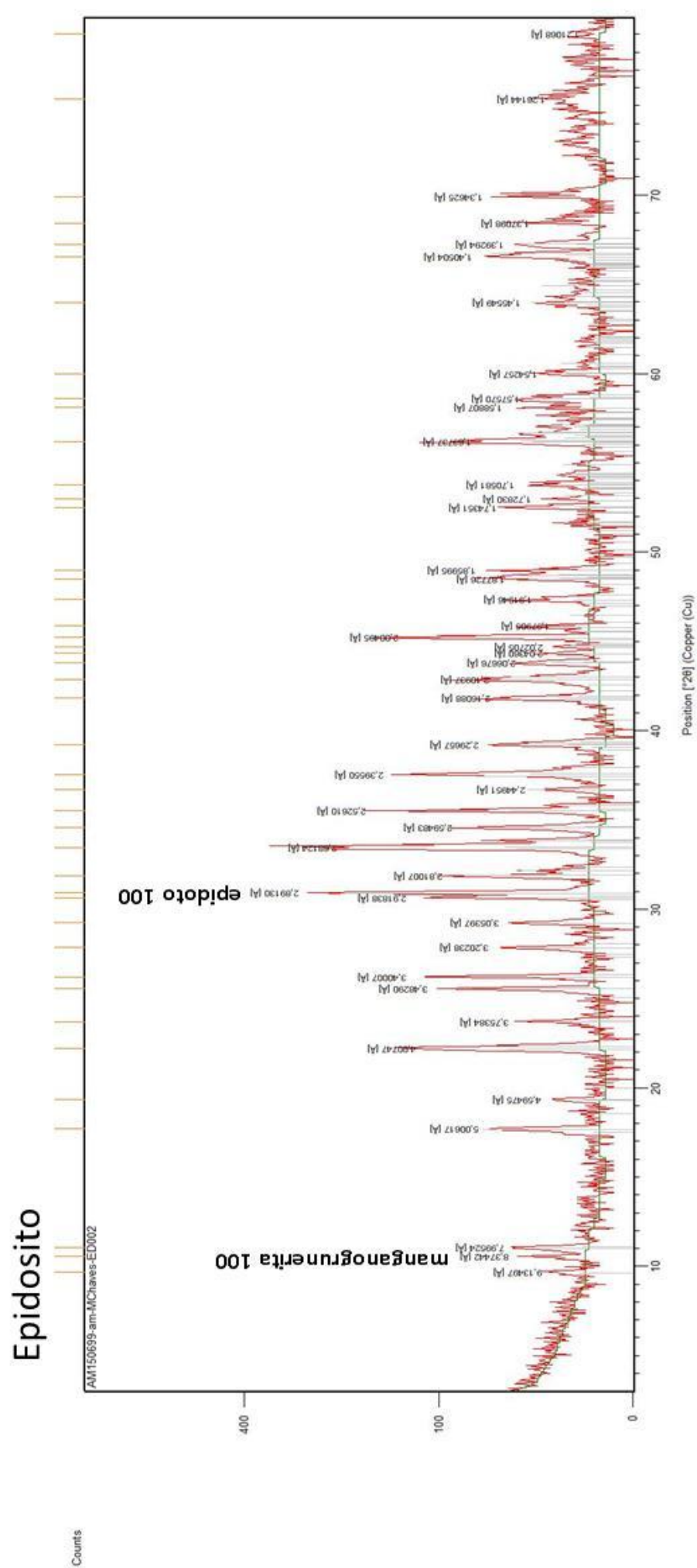
- Guimarães, M. L., Pedrosa-Soares, A. C., Baars, F. J., Grossi-Sad, J. H. (1996). *Mapa Geológico da Folha Malacacheta, Minas Gerais*. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: Projeto Espinhaço, Convênio COMIG/IGC-UFGM.
- Guimarães, M. L. V., Grossi-Sad, J. H. (1997). Geologia da Folha de Malacacheta. In: J. H. Grossi-Sad, L. M. Lobato, A. C. Pedrosa-Soares, B. S. Soares-Filho. *Projeto Espinhaço em CD-ROM*. Belo Horizonte: COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais.
- Le Maitre, R. W. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Oxford: Blackwell.
- Lobato, L. M., Pedrosa-Soares, A. C. (1993). Síntese dos recursos minerais do Cráton do São Francisco e faixas marginais em Minas Gerais. *Geonomos*, 1, 51-64.
- London, D. (2008). *Pegmatites*. Québec: Mineralogical Association of Canada (The Canadian Mineralogist, Special Publication 10).
- Miyashiro, A. (1973). *Metamorphism and metamorphic belts*. London: George Allen & Unwin.
- Noce, C. M., Pedrosa-Soares, A. C., Grossi-Sad, J. H., Baars, F. J., Guimarães, M. L. V., Mourão, M. A. A., Oliveira, M. J. R., Roque, N. C. (1997). Nova divisão estratigráfica regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: o registro de uma bacia neoproterozóica. *XIX Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 29-31. Ouro Preto: SBG-Núcleo MG.
- Pedrosa-Soares, A. C., Lobato, L. M., Magni, L. C. V., Faria, L. F. (1993). Arquitetura tectono-metamórfica do setor central da Faixa Araçuaí e suas relações com o Complexo Guanhães. *VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais*, 175-182. Belo Horizonte: SBG-Núcleo MG.
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Wiedmann, C. M., Pinto, C. P. (2001). The Araçuaí-West Congo Origin in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, 110, 307-323.
- Pedrosa-Soares, A. C., Campos, C., Noce, C. M., Silva, L. C., Novo, T., Roncato, J., Medeiros, S., Castañeda, C., Queiroga, G., Dantas, E., Dussin, I., Alkmim, F. (2011). Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related deposits. *Geological Society of London Special Publications*, 350, 25-51.
- Queiroga, G. N., Schulz, B., Martins, M. S., Castro, M. P., Pedrosa-Soares, A. C., Jordt-Evangelista, H., Silva, A. L. (2016). Thermobarometry and electron-microprobe Th-U-Pb monazite dating in garnet metapelites from the Capelinha Formation, Araçuaí Orogen, Brazil. *Revista da Escola de Minas*, 69, 33-43.
- Uhlein, A. (1991). *Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. Aspectos estratigráficos e estruturais*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP.
- Vassilikou-Dova, A. B., Lehmann, G. (1998). EPR of V^{4+} and Fe^{3+} in titanites. *Physic and Chemistry of Minerals*, 15, 559-563.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A. (1977). Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.

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

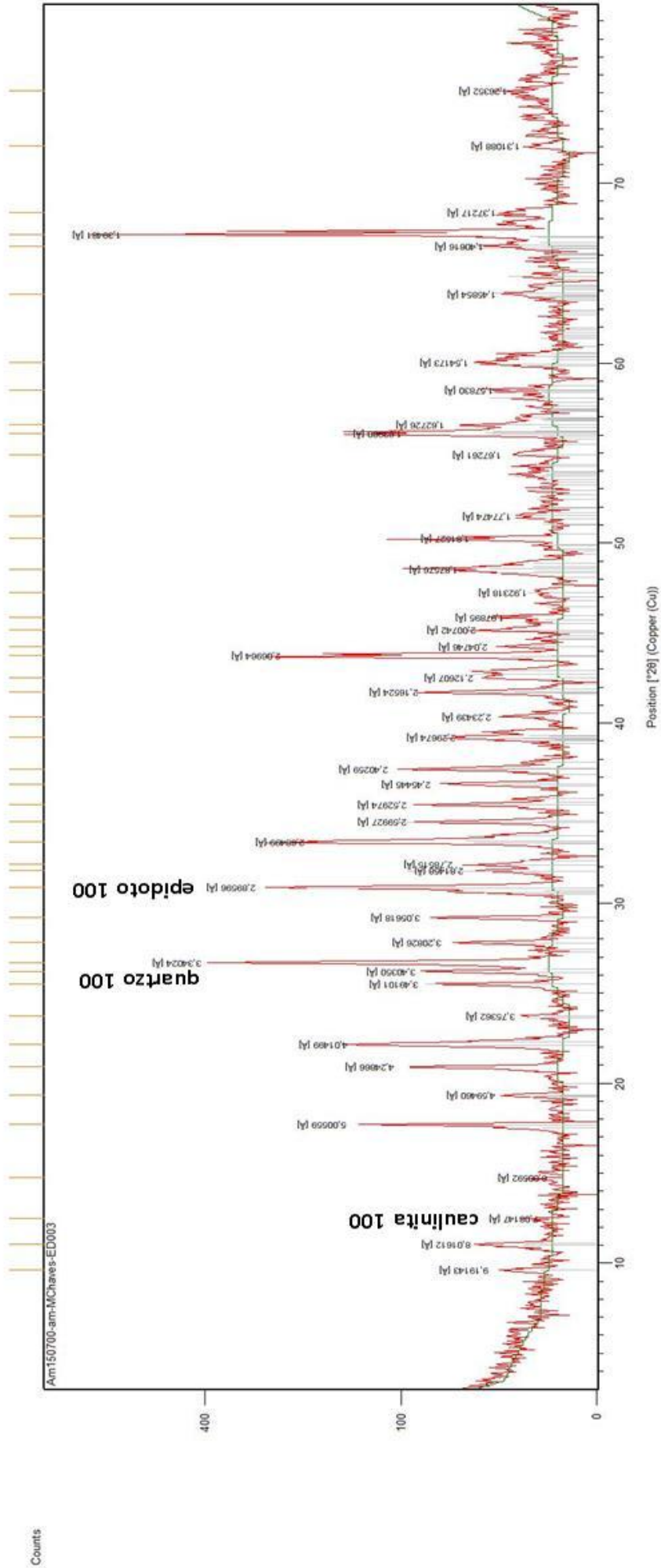
Feldspato branco







Rocha brechóide



ANEXO III – Resultados completos das análises por microsonda eletrônica

Group : Geologia Mario										
Sample : MC211215-Tit										
Weight percent										
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total	Comment
1	0,01	0,04	37,72	0,90	0,00	30,52	0,58	29,54	99,30	Titanita 01 - G1 - 1
2	0,00	0,00	37,21	0,91	0,00	30,66	0,75	29,78	99,31	Titanita 01 - G1 - 2
3	0,00	0,01	38,69	0,78	0,00	31,29	0,63	29,44	100,84	Titanita 01 - G1 - 3
Média	0,00	0,02	37,87	0,87	0,00	30,82	0,65	29,59	99,82	
4	0,00	0,00	37,72	0,99	0,00	30,57	0,54	29,27	99,09	Titanita 01 - G2 - 1
6	0,12	0,13	37,56	0,84	0,08	30,67	0,56	29,57	99,53	Titanita 01 - G2 - 3
	0,06	0,07	37,64	0,92	0,04	30,62	0,55	29,42	99,31	
7	0,00	0,00	35,41	0,89	0,00	29,44	0,62	27,89	94,24	Titanita 01 - G3 - 1
8	0,00	0,07	35,98	0,87	0,03	30,82	0,51	28,68	96,96	Titanita 01 - G3 - 2
9	0,00	0,00	36,19	0,92	0,05	30,65	0,60	28,46	96,87	Titanita 01 - G3 - 3
Média	0,00	0,02	35,86	0,89	0,03	30,30	0,58	28,34	96,02	
10	0,00	0,07	37,56	0,90	0,08	31,03	0,62	29,45	99,70	Titanita 01 - G4 - 1
11	0,02	0,03	36,75	0,98	0,00	31,18	0,73	29,39	99,07	Titanita 01 - G4 - 2
12	0,00	0,08	36,46	0,98	0,02	30,63	0,73	29,38	98,29	Titanita 01 - G4 - 3
Média	0,01	0,06	36,92	0,96	0,03	30,95	0,69	29,41	99,02	
13	0,00	0,08	36,93	0,93	0,01	31,20	0,74	29,16	99,04	Titanita 01 - G5 - 1
14	0,01	0,03	37,57	0,82	0,00	31,24	0,79	29,12	99,58	Titanita 01 - G5 - 2
15	0,00	0,00	37,38	0,83	0,07	31,18	0,50	29,44	99,40	Titanita 01 - G5 - 3
Média	0,00	0,04	37,29	0,86	0,03	31,21	0,68	29,24	99,34	
16	0,00	0,01	37,64	0,84	0,00	31,22	0,74	29,61	100,06	Titanita 01 - G6 - 1
17	0,00	0,00	37,99	1,04	0,00	31,41	0,63	29,83	100,90	Titanita 01 - G6 - 2
18	0,00	0,00	36,64	1,03	0,01	31,40	0,82	29,10	99,00	Titanita 01 - G6 - 3
Média	0,00	0,00	37,42	0,97	0,00	31,34	0,73	29,51	99,98	
19	0,00	0,07	36,72	1,10	0,00	31,17	0,80	29,54	99,40	Titanita 01 - G7 - 1
20	0,01	0,07	37,13	1,09	0,05	31,25	0,70	29,37	99,66	Titanita 01 - G7 - 2
21	0,04	0,03	37,24	1,06	0,00	31,22	0,74	29,35	99,67	Titanita 01 - G7 - 3
Média	0,02	0,05	37,03	1,08	0,02	31,22	0,74	29,42	99,58	
22	0,00	0,02	38,64	1,00	0,00	30,70	0,65	29,88	100,89	Titanita 01 - G8 - 1
23	0,01	0,01	38,61	0,91	0,04	31,42	0,58	29,31	100,89	Titanita 01 - G8 - 2
24	0,00	0,05	37,78	1,09	0,06	31,13	0,72	29,14	99,99	Titanita 01 - G8 - 3
Média	0,00	0,03	38,35	1,00	0,03	31,08	0,65	29,44	100,59	
26	0,00	0,01	37,33	0,86	0,01	30,56	0,60	29,42	98,78	Titanita 01 - G9 - 2
27	0,00	0,00	37,04	1,03	0,05	30,78	0,73	29,34	98,97	Titanita 01 - G9 - 3
Média	0,00	0,00	37,19	0,95	0,03	30,67	0,67	29,38	98,88	
28	0,00	0,02	38,11	0,92	0,00	30,24	0,78	29,26	99,34	Titanita 01 - G10 - 1
29	0,00	0,00	38,03	1,01	0,03	30,91	0,71	29,40	100,09	Titanita 01 - G10 - 2
30	0,00	0,00	36,71	1,06	0,01	30,34	0,56	29,36	98,04	Titanita 01 - G10 - 3
Média	0,00	0,01	37,61	1,00	0,02	30,50	0,68	29,34	99,16	
31	0,00	0,00	37,75	0,85	0,00	30,95	0,68	29,71	99,94	Titanita 01 - G11 - 1
32	0,00	0,00	37,24	0,88	0,06	31,18	0,62	29,37	99,35	Titanita 01 - G11 - 2
33	0,00	0,11	38,08	0,73	0,00	30,97	0,62	29,98	100,48	Titanita 01 - G11 - 3
Média	0,00	0,04	37,69	0,82	0,02	31,03	0,64	29,69	99,92	
34	0,00	0,00	38,09	0,91	0,00	30,29	0,57	29,70	99,56	Titanita 01 - G12 - 1
35	0,00	0,00	37,46	0,86	0,05	31,22	0,44	29,40	99,42	Titanita 01 - G12 - 2
36	0,01	0,00	37,55	0,99	0,00	30,87	0,62	29,59	99,62	Titanita 01 - G12 - 3
Média	0,00	0,00	37,70	0,92	0,02	30,79	0,54	29,56	99,53	

Group : Geologia Mario										
Sample : MC211215-Tit										
Weight percent										
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total	Comment
38	0,00	0,00	37,41	0,93	0,07	30,50	0,38	29,16	98,45	Titanita 01 - G13 - 2
39	0,00	0,04	37,97	0,97	0,00	31,16	0,73	29,04	99,91	Titanita 01 - G13 - 3
Média	0,00	0,02	37,69	0,95	0,04	30,83	0,55	29,10	99,18	
40	0,00	0,00	37,19	0,69	0,06	30,73	0,62	29,37	98,67	Titanita 01 - G14 - 1
41	0,02	0,02	37,54	0,71	0,01	30,18	0,61	29,66	98,74	Titanita 01 - G14 - 2
42	0,00	0,01	38,83	0,87	0,01	31,40	0,54	29,50	101,15	Titanita 01 - G14 - 3
Média	0,01	0,01	37,85	0,76	0,03	30,77	0,59	29,51	99,52	
43	0,00	0,05	37,94	1,11	0,00	30,26	0,44	29,52	99,33	Titanita 01 - G15 - 1
44	0,00	0,06	38,60	0,96	0,09	29,97	0,44	29,56	99,68	Titanita 01 - G15 - 2
45	0,01	0,05	38,86	0,74	0,02	30,29	0,35	29,62	99,94	Titanita 01 - G15 - 3
Média	0,00	0,05	38,47	0,94	0,04	30,17	0,41	29,56	99,65	
46	0,00	0,10	36,60	1,06	0,01	30,68	0,39	29,65	98,50	Titanita 02 - G1 - 1
48	0,00	0,04	36,22	1,30	0,03	32,19	0,53	29,39	99,72	Titanita 02 - G1 - 3
Média	0,00	0,07	36,41	1,18	0,02	31,44	0,46	29,52	99,11	
49	0,00	0,01	36,16	1,07	0,00	31,11	0,52	29,78	98,64	Titanita 02 - G2 - 1
50	0,00	0,00	37,33	1,09	0,01	30,14	0,63	29,84	99,03	Titanita 02 - G2 - 2
51	0,00	0,00	38,02	1,03	0,02	31,12	0,58	29,26	100,03	Titanita 02 - G2 - 3
Média	0,00	0,00	37,17	1,06	0,01	30,79	0,58	29,62	99,23	
52	0,00	0,00	36,67	1,01	0,14	30,46	0,61	29,15	98,04	Titanita 02 - G3 - 1
53	0,00	0,00	37,34	1,09	0,06	30,68	0,68	29,26	99,11	Titanita 02 - G3 - 2
Média	0,00	0,00	37,01	1,05	0,10	30,57	0,65	29,21	98,58	
55	0,00	0,00	37,68	1,07	0,09	31,01	0,57	29,57	99,99	Titanita 02 - G4 - 1
56	0,00	0,00	37,57	1,09	0,18	30,93	0,56	29,69	100,03	Titanita 02 - G4 - 2
57	0,00	0,00	37,72	1,05	0,05	30,78	0,65	29,21	99,47	Titanita 02 - G4 - 3
Média	0,00	0,00	37,66	1,07	0,11	30,91	0,59	29,49	99,83	
58	0,00	0,03	37,56	1,33	0,00	29,87	0,57	29,58	98,95	Titanita 02 - G5 - 1
59	0,00	0,00	36,79	1,13	0,08	31,11	0,66	29,19	98,95	Titanita 02 - G5 - 2
60	0,00	0,04	37,55	1,20	0,00	30,94	0,59	29,34	99,66	Titanita 02 - G5 - 3
Média	0,00	0,02	37,30	1,22	0,03	30,64	0,61	29,37	99,19	
61	0,00	0,04	38,25	1,18	0,11	31,16	0,56	29,95	101,25	Titanita 02 - G6 - 1
62	0,00	0,08	37,80	1,04	0,04	30,63	0,55	29,84	99,98	Titanita 02 - G6 - 2
63	0,00	0,08	38,26	1,07	0,00	31,15	0,51	29,62	100,68	Titanita 02 - G6 - 3
Média	0,00	0,06	38,10	1,10	0,05	30,98	0,54	29,81	100,63	
64	0,00	0,04	37,63	1,19	0,00	30,19	0,61	30,23	99,88	Titanita 02 - G7 - 1
66	0,00	0,00	37,68	1,18	0,10	30,33	0,61	30,02	99,91	Titanita 02 - G7 - 3
Média	0,00	0,02	37,66	1,18	0,05	30,26	0,61	30,12	99,89	
67	0,05	0,04	37,81	1,25	0,02	30,82	0,57	29,83	100,37	Titanita 02 - G8 - 1
68	0,02	0,07	37,26	1,12	0,07	30,87	0,53	29,76	99,68	Titanita 02 - G8 - 2
69	0,00	0,12	36,72	1,24	0,01	31,12	0,78	29,70	99,69	Titanita 02 - G8 - 3
Média	0,02	0,08	37,26	1,20	0,03	30,94	0,63	29,76	99,91	
70	0,00	0,01	37,65	1,29	0,01	30,69	0,58	30,06	100,29	Titanita 02 - G9 - 1
71	0,00	0,00	36,39	1,16	0,04	30,96	0,44	29,97	98,96	Titanita 02 - G9 - 2
Média	0,00	0,00	37,02	1,23	0,03	30,83	0,51	30,02	99,63	

Group : Geologia Mario										
Sample : MC211215-Tit										
Weight percent										
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total	Comment
73	0,00	0,00	37,10	1,12	0,01	31,07	0,72	29,05	99,06	Titanita 02 - G10 - 1
74	0,00	0,03	37,86	1,28	0,01	30,74	0,47	29,78	100,18	Titanita 02 - G10 - 2
75	0,00	0,03	37,61	1,23	0,03	30,09	0,58	29,58	99,15	Titanita 02 - G10 - 3
Média	0,00	0,02	37,52	1,21	0,02	30,64	0,59	29,47	99,46	
76	0,00	0,07	38,64	1,30	0,16	29,86	0,51	29,95	100,49	Titanita 02 - G11 - 1
77	0,00	0,00	37,82	1,21	0,00	28,65	0,60	29,99	98,27	Titanita 02 - G11 - 2
78	0,00	0,00	37,75	1,24	0,05	30,09	0,46	29,72	99,31	Titanita 02 - G11 - 3
Média	0,00	0,02	38,07	1,25	0,07	29,53	0,53	29,89	99,36	
79	0,00	0,05	36,96	1,15	0,00	31,08	0,65	29,52	99,41	Titanita 02 - G12 - 1
80	0,00	0,05	36,41	1,26	0,01	30,39	0,72	29,73	98,57	Titanita 02 - G12 - 2
81	0,00	0,00	38,01	1,17	0,11	29,58	0,77	29,64	99,29	Titanita 02 - G12 - 3
Média	0,00	0,03	37,13	1,19	0,04	30,35	0,71	29,63	99,09	
82	0,00	0,00	37,66	0,84	0,00	31,56	0,44	29,38	99,88	Titanita 02 - G13 - 1
83	0,00	0,00	36,88	1,26	0,04	31,11	0,67	29,70	99,66	Titanita 02 - G13 - 2
84	0,00	0,08	37,35	1,23	0,14	30,16	0,62	29,81	99,38	Titanita 02 - G13 - 3
Média	0,00	0,03	37,30	1,11	0,06	30,94	0,58	29,63	99,64	
85	0,00	0,14	36,00	1,74	0,09	30,24	1,01	29,94	99,17	Titanita 05 - G1 - 1
86	0,00	0,07	36,55	1,54	0,00	30,10	0,90	28,99	98,15	Titanita 05 - G1 - 2
Média	0,00	0,11	36,27	1,64	0,05	30,17	0,95	29,46	98,66	
88	0,01	0,05	37,40	1,12	0,01	31,52	0,70	29,86	100,66	Titanita 05 - G2 - 1
89	0,00	0,00	37,41	1,24	0,10	31,52	0,88	29,42	100,57	Titanita 05 - G2 - 2
90	0,00	0,04	37,28	1,13	0,03	30,74	0,75	29,68	99,65	Titanita 05 - G2 - 3
Média	0,00	0,03	37,36	1,16	0,05	31,26	0,77	29,66	100,29	
91	0,00	0,02	36,70	1,54	0,03	31,18	0,73	29,38	99,57	Titanita 05 - G3 - 1
92	0,00	0,00	36,77	1,52	0,00	30,61	0,88	29,89	99,67	Titanita 05 - G3 - 2
93	0,00	0,01	35,81	1,54	0,01	31,17	0,92	29,43	98,89	Titanita 05 - G3 - 3
Média	0,00	0,01	36,43	1,53	0,01	30,99	0,84	29,57	99,38	
94	0,01	0,01	37,80	1,43	0,14	30,31	0,91	29,84	100,44	Titanita 05 - G4 - 1
95	0,00	0,07	36,35	1,46	0,01	29,65	0,86	30,18	98,57	Titanita 05 - G4 - 2
96	0,00	0,02	37,26	1,46	0,00	29,67	0,83	29,83	99,07	Titanita 05 - G4 - 3
Média	0,00	0,03	37,13	1,45	0,05	29,88	0,87	29,95	99,36	
97	0,02	0,01	37,78	1,14	0,07	30,96	0,83	29,81	100,62	Titanita 05 - G5 - 1
98	0,00	0,08	38,19	1,08	0,03	31,12	0,36	29,47	100,33	Titanita 05 - G5 - 2
99	0,00	0,00	36,64	1,48	0,00	31,08	0,62	29,63	99,45	Titanita 05 - G5 - 3
Média	0,01	0,03	37,53	1,23	0,03	31,05	0,60	29,64	100,13	
100	0,00	0,05	35,84	1,51	0,05	31,49	0,85	29,43	99,21	Titanita 05 - G6 - 1
101	0,00	0,12	36,60	1,55	0,04	29,28	0,68	29,52	97,80	Titanita 05 - G6 - 2
102	0,00	0,03	36,29	1,44	0,04	30,27	0,91	29,80	98,79	Titanita 05 - G6 - 3
Média	0,00	0,07	36,24	1,50	0,05	30,35	0,81	29,58	98,60	
103	0,00	0,05	36,74	1,21	0,00	31,11	0,56	28,94	98,59	Titanita 05 - G7 - 1
104	0,00	0,08	36,49	0,80	0,02	30,96	0,60	29,07	98,01	Titanita 05 - G7 - 2
Média	0,00	0,06	36,61	1,00	0,01	31,03	0,58	29,00	98,30	
106	0,00	0,04	36,26	1,49	0,03	31,08	0,76	29,84	99,51	Titanita 05 - G8 - 1
107	0,00	0,03	36,47	1,55	0,03	31,08	0,65	29,31	99,12	Titanita 05 - G8 - 2
Média	0,00	0,04	36,37	1,52	0,03	31,08	0,70	29,58	99,32	

Group : Geologia Mario										
Sample : MC211215-Tit										
Weight percent										
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total	Comment
109	0,00	0,00	36,10	1,28	0,00	30,86	0,62	29,67	98,53	Titanita 05 - G9 - 1
110	0,01	0,00	37,78	0,75	0,06	30,18	0,35	29,45	98,58	Titanita 05 - G9 - 2
111	0,00	0,00	38,42	0,74	0,07	30,91	0,36	29,18	99,68	Titanita 05 - G9 - 3
Média	0,00	0,00	37,43	0,93	0,04	30,65	0,44	29,43	98,93	
112	0,00	0,09	36,86	1,44	0,03	30,97	0,85	29,69	99,93	Titanita 05 - G10 - 1
113	0,00	0,00	35,95	1,51	0,00	31,16	0,72	29,43	98,77	Titanita 05 - G10 - 2
114	0,00	0,03	38,84	1,10	0,02	31,07	0,79	29,44	101,30	Titanita 05 - G10 - 3
Média	0,00	0,04	37,22	1,35	0,02	31,07	0,79	29,52	100,00	
115	0,00	0,00	37,34	1,41	0,08	31,43	0,93	29,48	100,65	Titanita 05 - G11 - 1
116	0,00	0,04	36,98	1,45	0,03	31,46	0,79	29,57	100,31	Titanita 05 - G11 - 2
117	0,00	0,04	36,45	1,46	0,02	31,16	0,79	29,79	99,71	Titanita 05 - G11 - 3
Média	0,00	0,03	36,92	1,44	0,04	31,35	0,84	29,61	100,23	
118	0,00	0,01	38,81	1,07	0,06	30,47	0,65	30,17	101,24	Titanita 05 - G12 - 1
119	0,00	0,02	37,85	1,01	0,01	29,55	0,49	30,18	99,12	Titanita 05 - G12 - 2
120	0,00	0,00	37,01	1,18	0,00	31,09	0,72	29,91	99,91	Titanita 05 - G12 - 3
Média	0,00	0,01	37,89	1,09	0,02	30,37	0,62	30,09	100,09	
121	0,00	0,08	36,57	1,51	0,03	31,15	0,78	29,62	99,73	Titanita 05 - G13 - 1
122	0,00	0,11	36,85	1,54	0,00	31,18	0,94	29,38	99,99	Titanita 05 - G13 - 2
123	0,00	0,05	37,52	1,16	0,01	31,24	0,80	29,13	99,91	Titanita 05 - G13 - 3
Média	0,00	0,08	36,98	1,40	0,01	31,19	0,84	29,37	99,88	
124	0,00	0,00	37,26	1,18	0,04	30,48	0,43	29,43	98,81	Titanita 05 - G14 - 1
125	0,00	0,00	37,42	1,67	0,00	29,63	0,69	29,60	99,01	Titanita 05 - G14 - 2
126	0,00	0,14	35,22	1,69	0,00	31,28	0,73	29,17	98,22	Titanita 05 - G14 - 3
Média	0,00	0,05	36,63	1,51	0,01	30,46	0,61	29,40	98,68	
127	0,00	0,10	36,58	1,98	0,00	31,46	0,88	29,51	100,51	Titanita 05 - G15 - 1
128	0,00	0,11	35,64	1,96	0,00	30,58	0,83	29,90	99,01	Titanita 05 - G15 - 2
129	0,00	0,10	35,66	1,88	0,01	31,23	0,84	29,60	99,33	Titanita 05 - G15 - 3
Média	0,00	0,11	35,96	1,94	0,00	31,09	0,85	29,67	99,62	

Xambioá									
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total
T1-1	0,00	0,02	37,87	0,87	0,00	30,82	0,65	29,59	99,82
T1-2	0,06	0,07	37,64	0,92	0,04	30,62	0,55	29,42	99,31
T1-4	0,01	0,06	36,92	0,96	0,03	30,95	0,69	29,41	99,02
T1-5	0,00	0,04	37,29	0,86	0,03	31,21	0,68	29,24	99,34
T1-6	0,00	0,00	37,42	0,97	0,00	31,34	0,73	29,51	99,98
T1-7	0,02	0,05	37,03	1,08	0,02	31,22	0,74	29,42	99,58
T1-8	0,00	0,03	38,35	1,00	0,03	31,08	0,65	29,44	100,59
T1-9	0,00	0,00	37,19	0,95	0,03	30,67	0,67	29,38	98,88
T1-10	0,00	0,01	38,07	0,97	0,02	30,58	0,74	29,33	99,71
T1-11	0,00	0,04	37,69	0,82	0,02	31,03	0,64	29,69	99,92
T1-12	0,00	0,00	37,70	0,92	0,02	30,79	0,54	29,56	99,53
T1-13	0,00	0,02	37,69	0,95	0,04	30,83	0,55	29,10	99,18
T1-14	0,01	0,01	37,85	0,76	0,03	30,77	0,59	29,51	99,52
T1-15	0,00	0,05	38,47	0,94	0,04	30,17	0,41	29,56	99,65
Med	0,00	0,03	37,64	0,93	0,02	30,89	0,64	29,43	99,57
Graminha									
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total
T3-1	0,00	0,07	36,41	1,18	0,02	31,44	0,46	29,52	99,11
T3-2	0,00	0,00	37,17	1,06	0,01	30,79	0,58	29,62	99,23
T3-3	0,00	0,00	37,01	1,05	0,10	30,57	0,65	29,21	98,58
T3-4	0,00	0,00	37,66	1,07	0,11	30,91	0,59	29,49	99,83
T3-5	0,00	0,02	37,30	1,22	0,03	30,64	0,61	29,37	99,19
T3-6	0,00	0,06	38,10	1,10	0,05	30,98	0,54	29,81	100,63
T3-7	0,00	0,02	37,66	1,18	0,05	30,26	0,61	30,12	99,89
T3-8	0,02	0,08	37,26	1,20	0,03	30,94	0,63	29,76	99,91
T3-9	0,00	0,00	37,02	1,23	0,03	30,83	0,51	30,02	99,63
T3-10	0,00	0,02	37,52	1,21	0,02	30,64	0,59	29,47	99,46
T3-11	0,00	0,02	38,07	1,25	0,07	29,53	0,53	29,89	99,36
T3-12	0,00	0,03	37,30	1,11	0,06	30,94	0,58	29,63	99,64
Med	0,00	0,03	37,37	1,16	0,05	30,70	0,57	29,66	99,54
Bananal									
No.	MgO	Cr2O3	TiO2	Al2O3	MnO	SiO2	FeO	CaO	Total
T5-1	0,00	0,11	36,27	1,64	0,05	30,17	0,95	29,46	98,66
T5-2	0,00	0,03	37,36	1,16	0,05	31,26	0,77	29,66	100,29
T5-3	0,00	0,01	36,43	1,53	0,01	30,99	0,84	29,57	99,38
T5-4	0,00	0,03	37,13	1,45	0,05	29,88	0,87	29,95	99,36
T5-5	0,01	0,03	37,53	1,23	0,03	31,05	0,60	29,64	100,13
T5-6	0,00	0,07	36,24	1,50	0,05	30,35	0,81	29,58	98,60
T5-7	0,00	0,06	36,61	1,00	0,01	31,03	0,58	29,00	98,30
T5-8	0,00	0,04	36,37	1,52	0,03	31,08	0,70	29,58	99,32
T5-9	0,00	0,00	37,43	0,93	0,04	30,65	0,44	29,43	98,93
T5-10	0,00	0,04	37,22	1,35	0,02	31,07	0,79	29,52	100,00
T5-11	0,00	0,03	36,92	1,44	0,04	31,35	0,84	29,61	100,23
T5-12	0,00	0,01	37,89	1,09	0,02	30,37	0,62	30,09	100,09
T5-13	0,00	0,08	36,98	1,40	0,01	31,19	0,84	29,37	99,88
T5-14	0,00	0,05	36,63	1,51	0,01	30,46	0,61	29,40	98,68
T5-15	0,00	0,11	35,96	1,94	0,00	31,09	0,85	29,67	99,62
Med	0,00	0,05	36,87	1,38	0,03	30,80	0,74	29,57	99,43