



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DE
COLUMBITA-TANTALITA DE PEGMATITOS DA PROVÍNCIA
PEGMATÍTICA DA BORBOREMA**

João Henrique Guidete de Almeida

MONOGRAFIA nº 395

Ouro Preto, abril de 2021

**CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DE
COLUMBITA-TANTALITA DE PEGMATITOS DA
PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DE BORBOREMA**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 395

CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E QUÍMICA DE COLUMBITA-TANTALITA DE PEGMATITOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

João Henrique Guidete de Almeida

Orientador

Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/1.

OURO PRETO

2021

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

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

Revisão geral: João Henrique Guidete de Almeida

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447c Almeida, João Henrique Guidete de.
Caracterização mineralógica e química de columbita-tantalita da
Província Pegmatítica de Borborema. [manuscrito] / João Henrique
Guidete de Almeida. - 2021.
65 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Mineralogia. 2. Pegmatitos. 3. Nióbio. 4. Tântalo. 5. Geoquímica. I.
Cipriano, Ricardo Augusto Scholz. II. Universidade Federal de Ouro Preto.
III. Título.

CDU 553.063

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

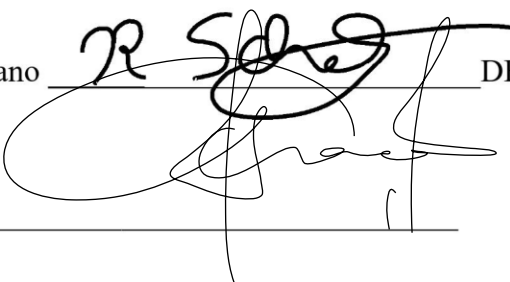
TÍTULO: Caracterização Mineralógica e Química de Columbita-Tantalita de Pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema

AUTORA: João Henrique Guidete de Almeida

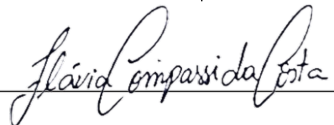
ORIENTADOR: Ricardo Augusto Scholz Cipriano

Aprovada em: 23 de abril de 2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Augusto Scholz Cipriano  _____ DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Leonardo Martins Graça _____ DEGEO/UFOP

Geol. MSc Flávia Compassi da Costa  _____ DEGO/UFOP

Ouro Preto, 23/04/2021

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu pai Flávio e à minha mãe Rosangela, que sempre me apoiaram em todas as decisões, e deram força em todos os desafios. Trilharam essa jornada ao meu lado, dando todo o suporte necessário, em todos os momentos. “Sonharemos os seus sonhos”. Agradeço a Deus por saber que sempre está me olhando e cuidando.

Agradeço também aos amigos do Clan, pessoas especiais para mim, que desde sempre estão juntos comigo. À geologia 14.1, aos mais que amigos, e à Geoconsultoria Jr pelas amizades, crescimento e aprendizado imensos. À Mariana, que me apoiou e motivou sempre, nos momentos bons e ruins, com muito amor e carinho. À República Acrópole e todos os seus moradores e ex-alunos, pela irmandade, cumplicidade e momentos, contem comigo sempre.

À FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo apoio financeiro concedido através do Projeto de Pesquisa PPM00588-18. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq 303218/2018-5. Ao laboratório de Microanálises do DEGEO/EM – Laboratório integrante da RMIC, Rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gerais – FAPEMIG, ao Laboratório de Geoquímica Isotópica (LOPAG)/UFOP, pelos dados geoquímicos gerados. Ao projeto do edital PROPP 13/2020 – processo n.: 23109.000928/2020-33 – Projeto: Desenvolvimento de Materiais de Referência para Geocronologia U/Pb e Estudo dos Pegmatitos de MG, PB e RN.

Por fim, agradeço ao professor Ricardo Scholz, por todo o suporte, ajuda e compreensão ao longo dessa trajetória e, principalmente, para a realização deste trabalho. Agradeço também a todos os professores e professoras da UFOP, principalmente da Escola de Minas e do Departamento de Geologia, pelo aprendizado e ensino de qualidade.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
2 MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1 METODOLOGIA	3
2.1.1 Revisão bibliográfica	3
2.1.2 Preparo de amostras	4
2.1.3 MEV-EDS e BSE.....	7
3 GEOLOGIA DE PEGMATITOS.....	9
3.1 CLASSIFICAÇÃO.....	10
4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	15
4.1 PROVÍNCIA BORBOREMA.....	15
4.2 DOMÍNIOS TECTÔNICOS DA PROVÍNCIA BORBOREMA	16
4.3 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA	18
4.3.1 Contexto Geotectônico.....	18
4.3.2 Faixa Seridó	19
5 COLUMBITA-TANTALITA EM GEOCRONOLOGIA.....	21
6 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO.....	23
6.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS	23
6.1.1 Amostra “00”	24
6.1.2 Amostra “073”	26
6.1.3 Amostra “77”	28
6.1.4 Amostra “AM-101”	29
6.1.5 Amostra “AM-115”.....	31
6.1.6 Amostra “PEG-VON”	33
6.1.7 Amostra “PER 15d”	35
6.1.8 Amostra “PT099”.....	36
7 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	39

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
--	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Anéis, amostras e marcadores colados sobre adesivo antes da etapa de adição de resina.....	5
Figura 2.2 - Superfícies de vidro preparadas para o desbaste das amostras, e potes contendo abrasivos de carbureto de silício (320, 500 e 3000 micras).....	6
Figura 3.1 - Cristais de turmalina Paraíba do pegmatito Quintos, associadas a quartzo e albita, substituídas total ou parcialmente por lepidolita (Beurlen <i>et al.</i> 2011)....	10
Figura 3.2 - Bloco diagrama idealizado mostrando as relações entre as três unidades estruturais dentro dos corpos pegmatíticos, e suas zonas. (Cameron <i>et al.</i> 1949, modificado por Gandini 1999).	12
Figura 4.1 - Domínios tectônicos e principais estruturas da Província Borborema. Zonas de cisalhamento: Sobral–Pedro II (SO), Senador Pompeu (SP), Orós–Aiuaba (OR), Porto Alegre (PO), São Vicente (SV), Piauí–João Câmara (JC), Malta (MA), Serra do Caboclo (SC), Con Congo–Cruzeiro do Nordeste (CC), Serra da Jabitaca (SJ), Jatobá–Itaíba (JI), Macururé–Riacho Seco (MR), Belo Monte–Jeremoabo (BJ), São Miguel do Aleixo (SA) e Itaporanga (IA); Lineamentos: Patos (PA) e Pernambuco (PE); nappes da Faixa Riacho do Pontal (RP).	15
Figura 4.2 - Modelo de subdivisão tectônica da Província Borborema (modificado de Santos 1996, Brito Neves <i>et al.</i> 2000, CPRM 2001).....	17
Figura 4.3 – Localização da Província Pegmatítica da Borborema e comparação com outras ocorrências pegmatíticas.	18
Figura 4.4 – Localização das Formações presentes no Grupo Seridó.....	19
Figura 6.1 - Diagrama composicional da amostra 00. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.	24
Figura 6.2 - Composição química e imagem BSE da amostra 00 resultantes da análise em MEV.	25
Figura 6.3 - Diagrama composicional da amostra 073. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.	26
Figura 6.4 - Composição química e imagem BSE da amostra 073 resultantes da análise em MEV.	27
Figura 6.5 - Composição química e imagem BSE da amostra 77 resultantes da análise em MEV.	28
Figura 6.6 - Diagrama composicional da amostra AM-101. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como mangano-tantalita.	29
Figura 6.7 - Composição química e imagem BSE da amostra AM-101 resultantes da análise em MEV.	30
Figura 6.8 - Diagrama composicional da amostra AM-115. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.	31

Figura 6.9 - Composição química e imagem BSE da amostra AM-115 resultantes da análise em MEV.	32
Figura 6.10 - Diagrama composicional da amostra PEG-VON. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-tantalita..	33
Figura 6.11 - Composição química e imagem BSE da amostra PEG-VON resultantes da análise em MEV.	34
Figura 6.12 - Composição química e imagem BSE da amostra PER 15d resultantes da análise em MEV.	35
Figura 6.13 - Diagrama composicional da amostra PT099. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como mangano-tantalita.	36
Figura 6.14 - Composição química e imagem BSE da amostra PT099 resultantes da análise em MEV.	37
Figura 7.1 - Diagrama de comparação composicional entre as amostras 0, 073, AM-101, AM-115, PEG-VON e PT099 da série coltan.	39

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Localização, mineralogia e encaixante das amostras.....	4
Quadro 2.2 - Processos e tempo para desbaste e polimento das amostras.	7
Quadro 3.1 - Classificação de pegmatitos graníticos (Černý, 1991, adaptado por Castañeda, 1997).	14
Quadro 6.1 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra 00 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.	24
Quadro 6.2 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra 073 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.	26
Quadro 6.3 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra AM-101 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.	29
Quadro 6.4 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra AM-115 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005 e a média entre eles.	31
Quadro 6.5 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra PEG-VON nos pontos 001, 002, 003, 004 e a média entre eles.	33
Quadro 6.6 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra PT099 nos pontos 001, 002, 003 e a média entre eles.	36

Resumo

Por muito tempo, métodos de datação de rocha a partir de minerais e elementos químicos específicos eram repetidamente utilizados. Com o passar do tempo, outros minerais foram ganhando visibilidade acerca de seu potencial no uso de estudos em geocronologia. Dentre esses, a columbita e a tantalita, representados, respectivamente, por óxidos de nióbio e de tântalo, vêm ganhando destaque. Como as informações sobre esses minerais para estudos geocronológicos ainda são restritas, o presente trabalho visa investigar a química e mineralogia dos mesmos, a fim de fornecer dados que servirão para a elaboração de um padrão de datação, a partir de informações detalhadas desse tipo de amostra. Estes minerais são encontrados em pegmatitos, rochas que geralmente apresentam alto potencial econômico, uma vez que diversos produtos podem ser extraídos dessa fonte, como insumos industriais, materiais para a construção civil, além de conter uma série de minerais gemológicos. Desta forma, estudos geocronológicos com columbita e tantalita, a fim de datar sua rocha hospedeira, se fazem importantes para compor a gama de informações geológicas de um corpo que apresenta um ou mais recursos minerais. Além disso, a datação utilizando os minerais deste estudo apresenta potencial igual ou maior de qualidade de resultados, se comparado com métodos e minerais que são mais comumente utilizados. Um total de 8 amostras da Província Pegmatítica da Borborema foram analisadas, dentre essas, 6 mostraram-se pertencentes ao grupo da série mineralógica deste trabalho e passíveis de serem estudadas para datação. A determinação da composição e definição do mineral, foi realizada através de diagramas composicionais, que ao final serviram de comparação entre as amostras. Esses diagramas mostraram uma tendência de associação de nióbio ao ferro, e de tântalo ao manganês. Mediante essas 6 amostras, foi elaborada uma escala determinando quais seriam as mais indicadas para datação, levando em conta fatores como homogeneidade composicional e estrutural, presença de cavidades, fraturas e zonamentos.

Palavras-chave: Columbita, tantalita, nióbio, tântalo, columbita-tantalita.

Abstract

For a long time, methods of dating rock from specific minerals and chemical elements were used repeatedly. Over time, other minerals have been gaining visibility about their potential in the use of studies in geochronology. Among these, columbite and tantalite, represented, respectively, by niobium and tantalum oxides, are gaining prominence. As the information on these minerals for geochronological studies is still limited, the present work aims to investigate their chemistry and mineralogy, in order to provide data that will serve for the elaboration of a dating pattern, from detailed information of this type of sample. . These minerals are found in pegmatites, rocks that generally have high economic potential, since several products can be extracted from this source, such as industrial inputs, materials for civil construction, in addition to containing a series of gemological minerals. In this way, geochronological studies with columbite and tantalite, in order to date its host rock, are important to compose the range of geological information of a body that has one or more mineral resources. In addition, dating using the minerals in this study has equal or greater potential for quality of results, compared to methods and minerals that are more commonly used. A total of 8 samples from the Província Pegmatítica da Borborema were analyzed, among these, 6 were shown to belong to the group of the mineralogical series of this study and could be studied for dating. The determination of the composition and definition of the mineral was carried out through compositional diagrams, which at the end served as a comparison between the samples. These diagrams show a tendency of association of niobium with iron, and tantalum with manganese. From these 6, a scale was elaborated determining which would be the most suitable for dating, taking into account factors such as compositional and structural homogeneity, presence of cavities, fractures and zoning.

Key words: Columbite, tantalite, niobium, tantalum, columbite-tantalite.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A série mineral de solução-sólida conhecida como columbita-tantalita é um dos principais componentes dos pegmatitos da Província Borborema, e segundo Lira (2016) esta apresenta quantidades significativas de tântalo (Ta) e nióbio (Nb) nos concentrados. Como o próprio nome já diz, o Ta faz parte da composição da tantalita, e o Nb, da columbita. Geralmente, Ta e Nb são encontrados associados na natureza por conta de suas propriedades físico-químicas semelhantes.

A solução-sólida columbita-tantalita, segundo Simandl (2002), é composta pela columbita pura $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6]$ e pela tantalita pura $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6]$, e apresenta membros intermediários que são a ferro-columbita $(\text{FeNb}_2\text{O}_6)$, manganó-columbita $(\text{MnNb}_2\text{O}_6)$, ferro-tantalita $(\text{FeTa}_2\text{O}_6)$ e manganó-tantalita $(\text{MnTa}_2\text{O}_6)$. Lira (2016) expõe que neste grupo inclui-se também a magnésio-columbita $[(\text{Mg},\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6]$ e pequenas quantidades de Sn, W e U.

Esses elementos (Nb e Ta) que compõem a columbita e a tantalita apresentam relevante interesse econômico. Devido aos grandes e rápidos avanços na tecnologia mundial, estes metais estão presentes em diversos setores, desde utilização em equipamentos para a indústria, até produtos finais utilizados no dia a dia das pessoas.

Segundo os websites *SoCientifica* e *tabelaperiodica*, entre as utilizações do Nióbio, vale destacar sua importância na indústria siderúrgica (produção de aço), na indústria de matérias supercondutores, indústria aeroespacial, de energia atômica, eletrônica, campo médico, entre outros. Já o Tântalo tem seus principais usos na indústria eletrônica, fabricação de implantes médicos, eletrodos, retificadores, ligas metálicas e etc.

Além da importância direta desses elementos na indústria, e consequentemente desses minerais, destaca-se também um segundo ponto de relevância para eles: datação de suas rochas hospedeiras. Assim como adotado por Vecchi (2015), para as variações químicas da série mineral columbita-tantalita, o emprego do termo genérico coltan será adotado para se referir a qualquer um deles quando não houver necessidade de uma distinção química. Os minerais da série coltan tem a capacidade de reter elementos como U e Th em sua estrutura, explicando sua funcionalidade para datação de rochas.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo realizar estudos químicos e mineralógicos de amostras de minerais da série columbíta-tantalita (coltan) provenientes de diversos pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema, localizada à porção leste do Nordeste Brasileiro. A falta de padrões internacionais diminui a possibilidade da utilização dessa série mineral para datação. Este estudo servirá de base para que futuros trabalhos venham a desenvolver estes padrões para geocronologia a partir dos resultados obtidos nas pesquisas químicas e mineralógicas destes minerais.

CAPÍTULO 2

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 METODOLOGIA

A metodologia empregada na elaboração deste trabalho consiste nos seguintes fatores:

- Revisão bibliográfica contendo uma síntese da geologia de pegmatitos;
- Revisão bibliográfica da geologia regional do distrito pegmatítico de onde as amostras foram obtidas e da utilização destes minerais no estudo de pegmatitos;
- Preparo de embutimentos de resina e caracterização química por microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS – DEGEO/UFOP) e imagens por elétrons retroespalhados (BSE) – Laboratório de Microscopia e Microanálises (LMic);
- Interpretação e análise dos resultados.

2.1.1 Revisão bibliográfica

Diversos trabalhos e estudos sobre a série mineral coltan foram consultados, além de artigos e pesquisas sobre suas implicações econômicas e utilização em geocronologia. Além disso, houve a pesquisa de trabalhos relacionados à Província Borborema, afim de entender sua localização e geologia, e sobre pegmatitos de uma maneira geral.

Associada à Província Borborema, uma porção específica concentra os pegmatitos. Devido a essa concentração, esta porção recebe o nome de Província Pegmatítica da Borborema. A revisão bibliográfica da Província concentra-se mais nessa porção, uma vez que as amostras analisadas fazem parte desta região. Estas amostras foram listadas (Quadro 2.1) e suas principais características conhecidas foram expostas.

Quadro 2.1 - Localização, mineralogia e encaixante das amostras.

Nº	Zona	X	Y	Z	Mineralogia	Encaixante
00	24M				Columbíta	
073	24M	792474	9297195	439	Mica + feldspato + quartzo + columbíta	Xisto
77	24M	790148	9289288	432	Quartzo + feldspato + turmalina preta + berilo	Xisto
AM-101	24M				Tantalita	
AM-115	24M	602457	9272181	407	Columbíta	
PEG-VON	24M				Columbíta	
PER 15d	24M					
PT099	24M				Tantalita	

2.1.2 Preparo de amostras

O estudo foi realizado a partir de 8 amostras dos minerais columbíta e tantalita, do acervo pessoal do professor orientador deste trabalho. Tais amostras pertencem à Província Pegmatítica da Borborema, e sua coleta foi realizada antes do início do presente trabalho.

Primeiramente estas amostras foram preparadas por embutimento em resina, etapa necessária para possibilitar a análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura), por *backscattered electron composition* (BEC), e análises químicas através do EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X).

Primeiramente são separados os anéis que envolverão a resina. O lado mais liso do anel é lixado em lixas convencionais e depois em abrasivos de carbureto de silício, até que esteja perfeitamente plano. O teste é feito colocando água sobre uma superfície de vidro na qual o anel é colocado em cima, e se ao virar o anel para baixo, ele continuar preso no vidro apenas pela tensão superficial gerada pela água, significa que sua superfície está pronta.

A segunda etapa consiste em desenhar em uma lâmina de vidro o círculo da envoltória do anel que será fixado. Após isto, ocorre a desagregação dos minerais seguido da escolha das melhores porções (visualmente – olho nu, lupa e microscópio) para integrar o embutimento. Uma vez

selecionadas, o melhor e maior pedaço possível de cada amostra tem sua face fixada em um adesivo colado sobre o vidro no qual o anel foi desenhado, para que o mineral não se mova. O anel é colado sobre o mesmo adesivo, junto com um marcador entre as amostras (em alguns casos), para ajudar na localização e evitar confusão (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Anéis, amostras e marcadores colados sobre adesivo antes da etapa de adição de resina (Fonte: autor).

A próxima etapa é feita aproximadamente um dia após o conjunto ter descansado em um recipiente com sílica, e consiste na adição da resina propriamente dita. A resina é preparada misturando um tipo de cola epóxi a um endurecedor (proporção 56:9) que é despejada na amostra com o auxílio de um bastão de vidro para evitar a formação de bolhas. Feita a adição da resina, a amostra é levada para a estufa por cerca de 15 minutos.

Terminado todo esse processo, começa a etapa de desgaste da superfície do embutimento para expor a face do mineral, seguido de polimento em politriz com alumina. Para isso, a amostra é desbastada em abrasivos de carbureto de silício de 320, 500 e 3000 micras (μ) que são espalhados sobre placas de vidro e umidificados com água (Figura 2.2). Entre cada um dos passos, a amostra é lavada com água corrente e colocada em banho ultrassônico.

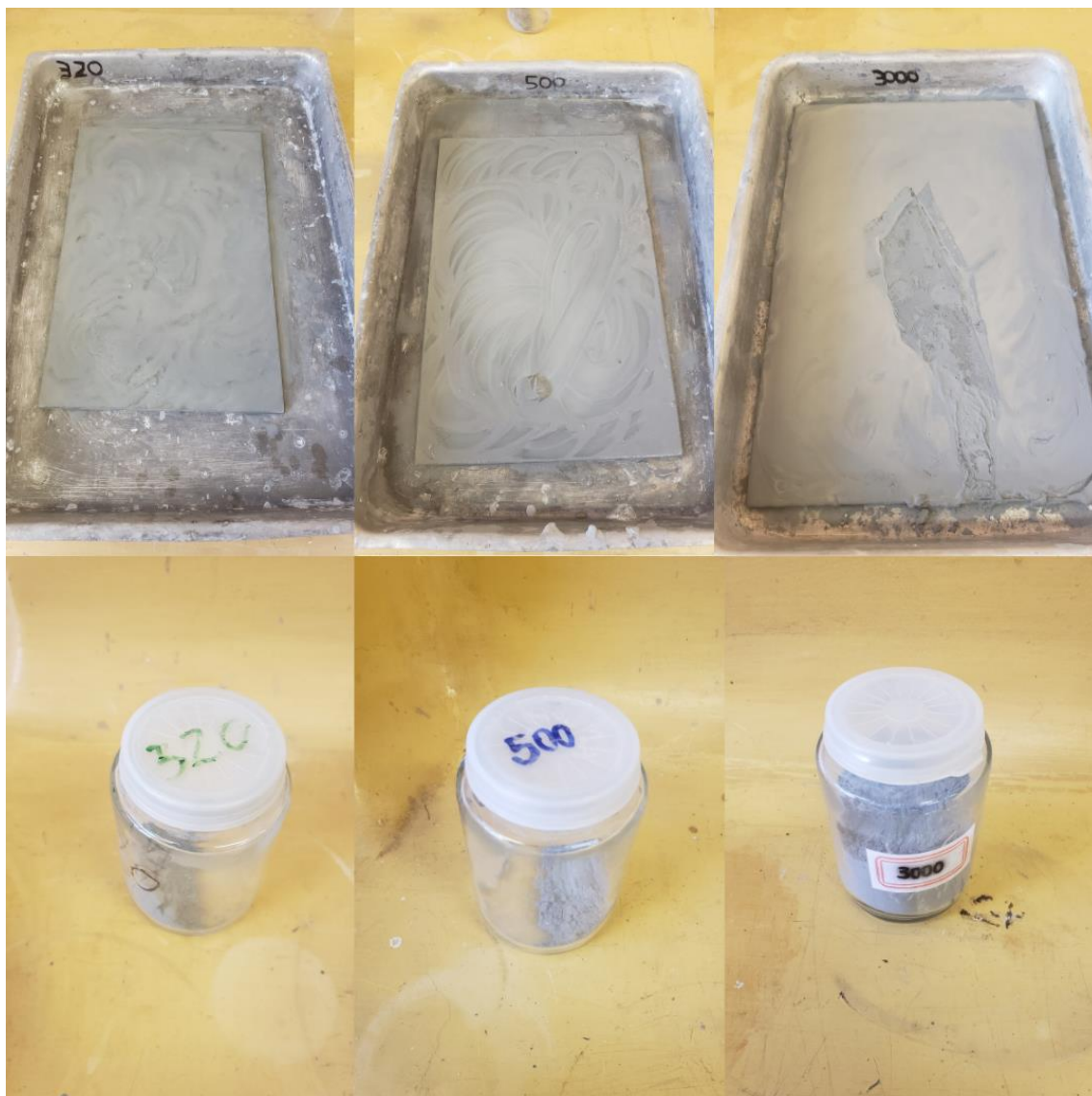


Figura 2.2 - Superfícies de vidro preparadas para o desbaste das amostras, e pots contendo abrasivos de carbureto de silício (320, 500 e 3000 micras) (Fonte: autor).

Através de movimentos circulares, alternando o ângulo da amostra para garantir que toda a área seja afetada igualmente, esse processo de desbaste é realizado de forma pré-determinada em cada um dos abrasivos e na politriz, conforme o quadro 2.2:

Quadro 2.2 - Processos e tempo para desbaste e polimento das amostras.

Processo	Tempo
Desbaste 320 μ	Até expor cerca de 75% da face dos minerais
Desbaste 500 μ	5 minutos
Desbaste 3000 μ	10 minutos
Polimento com Alumina	10 minutos

Ao término desta etapa, a amostra está pronta para ser levada ao laboratório para receber os últimos ajustes antes das análises no MEV serem realizadas.

2.1.3 MEV-EDS e BSE

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) produz imagens de alta resolução em grandes ampliações (até 300.000 vezes). A partir de um vácuo formado no ambiente, feixes de elétrons são incididos no material através de um filamento capilar de tungstênio, formando a imagem eletrônica de varredura (Fonte: website LMic, DEGEO-UFOP). Esse método é amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo a mineralogia, e, em conjunto com outros acessórios, como o EDS (Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X), é capaz de determinar a composição química qualitativa e semiquantitativa das amostras a partir da detecção dos raios-x emitidos pela mesma. Segundo Duarte (2003), a imagem eletrônica de varredura mostra a contagem dos elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) e retroespalhados (BSE – *backscattering electrons*) emitidos pelas amostras, em tons de cinza.

O sinal dos elétrons retroespalhados (BSE) são resultados de interações que ocorrem em porções mais interiores das amostras, fato justificado devido a sua energia elevada, e segundo Dedavid (2007), indica a captação de energias que vão além dos valores de energia dos elétrons primários fornecendo informações de profundidade.

O sistema EDS apresenta um limite de detecção de 1%, podendo variar de acordo com especificações prévias, como por exemplo o tempo de exposição da amostra ao equipamento. Uma grande vantagem deste sistema é a possibilidade de se realizar um perfil químico que define a variação de composição em pontos específicos do mineral, ao longo de uma linha preestabelecida (Fonte:

website LMic, DEGEO-UFOP). Com tal informação, é possível tecer comentários acerca da homogeneidade composicional do mineral, possíveis zoneamentos químicos, entre outros.

No caso de minerais não condutores de corrente elétrica, é necessário um último preparo antes das análises serem realizadas. Este preparo é chamado de metalização, e consiste em recobrir a face da amostra com uma película de material condutor, como por exemplo carbono, possibilitando a passagem de corrente elétrica.

O MEV-EDS foi utilizado para analisar todas as amostras do trabalho, afim de realizar o estudo geoquímico desta série coltan. A ferramenta em questão proporcionou informações de extrema importância para a caracterização mineralógica, através das imagens de alta resolução, do mapeamento e perfis composicionais das amostras, e da identificação dos elementos que compõe os minerais do estudo. Todas as discussões e interpretações foram realizadas a partir da revisão bibliográfica e dos dados gerados pelo Microscópio Eletrônico de Varredura.

CAPÍTULO 3

GEOLOGIA DE PEGMATITOS

O termo pegmatito é derivado do grego, cujo significado é “unido ou cimentado em uma estrutura” (Kemp 1924) e refere-se à textura de algumas rochas, caracterizando rochas ígneas intrusivas, com cristais grande, de granulação extremamente variada (geralmente, muitos dos cristais terão comprimento maior que 1 centímetro). Segundo Winkler (1949), a presença destes grandes minerais nos diz que os pegmatitos sofrem um resfriamento lento devido a profundidade na crosta, aonde o calor tem dificuldades para escapar

Já Phelps & Morton (2020) falam que a taxa de crescimento dos cristais está relacionada a presença de água. Ela reduz a viscosidade do magma e as temperaturas de cristalização, enquanto aumenta o transporte do magma, permitindo que ocorra uma cristalização em temperatura muito mais baixa. Assim, relações de profundidade e tempo para resfriamento seriam diferentes do que é tradicionalmente conhecido.

Os pegmatitos se formam, segundo Dias (2013), em locais profundos da crosta continental em vastas câmaras magmáticas. De forma simplificada, o processo de formação dos pegmatitos começa com a ascensão de um magma granítico (intrusões ou plúton) que se acopla na crosta. Esse plúton então começa a resfriar e fraturar as rochas encaixantes que são preenchidas pelo magma residual rico em voláteis, que ainda não solidificou. Ao término do resfriamento, alguns elementos raros terão se concentrado em eventuais formações de bolsões ou “pockets” que podem apresentar cristalizações variadas.

O que torna os pegmatitos tão especiais é que eles se formam muito tarde no processo, e são como um aspirador de processos ígneos - eles recolhem todos os elementos restantes que não cabem na estrutura cristalina dos minerais ígneos comuns (como quartzo e feldspato/plagioclásio). Segundo London (2008) sua composição mineralógica é comumente granítica (quartzo, plagioclásio e feldspato potássico), entretanto, elementos como Li, Be, B, F, P, Sn, Ta, Nb e ETR's (Elementos Terras Raras) podem constituir importantes assembleias mineralógicas que são distintamente não graníticas.

Quanto a sua espessura, pode variar de centímetros até dezenas de metros (raramente centenas), com comprimento também muito variável. São conhecidos pegmatitos bastante profundos (até 700 metros), sendo que 90% deles são lavrados em profundidades de até 80 metros. Seu formato é predominantemente tabular, entretanto pode variar a depender da rocha encaixante.

Essas rochas tem grande importância econômica, segundo Breaks (2006), relacionada à produção de insumos industriais (B, Be, Li, Mo, W, Ta, Nb, Th e U) e materiais para a construção

civil (feldspatos e argilominerais produto de seu intemperismo), além da conter minerais gemológicos como turmalina (Figura 3.1), berilo, espodumênio, entre outros.

A maneira diferente de como os pegmatitos se formam, segundo Iwata (1995), faz com que alguns elementos, normalmente encontrados em baixas concentrações em muitas rochas ígneas, acabem sendo muito concentrados nos pegmatitos. Isso os torna um recurso valioso de minério para certos elementos. Os depósitos pegmatitos geralmente não são tão grandes, dessa forma, embora o minério seja muito valioso, nem sempre vale a pena explorá-los.



Figura 3.1 - Cristais de turmalina Paraíba do pegmatito Quintos, associadas a quartzo e albita, substituídas total ou parcialmente por lepidolita (Beurlen *et al.* 2011).

3.1 CLASSIFICAÇÃO

A classificação de um pegmatito é feita de muitas maneiras diferentes, propostas por diversos autores, e levando em conta diversas características da rocha, como tamanho, relação com as encaixantes, forma, textura interna, mineralogia, gênese, entre outras.

Seguindo uma breve linha do tempo, Fersman (1931) classifica os pegmatitos em homogêneos ou simples, e heterogêneos ou complexos, levando em consideração a mineralogia e estrutura interna da rocha. Também com base na mineralogia, Landes (1933) sugere três grupos para os pegmatitos: ácidos, intermediários e básicos, subdividindo cada um desses três em simples ou complexos. Os

simples são aqueles onde não houve uma substituição hidrotermal, e os complexos, além de terem sofrido esse processo, muitas vezes possuem minerais raros em sua composição.

Pensando nas características texturais e estruturais de zoneamento, Johnston (1945) também divide a classificação dos pegmatitos em homogêneo e heterogêneo, onde a primeira apresenta textura uniforme e a segunda, zoneamentos, cristais de diferentes formatos e composições, e minerais raros.

A partir do estudo sistemático de estruturas de pegmatitos norte-americanos, Cameron *et al.* (1949) divide a estrutura interna dos pegmatitos zonados em três partes principais, sendo elas (Figura 3.2):

- I. **Zonas de Cristalização Primária:** Camadas sucessivas diferenciadas pela sua composição mineralógica e textural, distribuídas de forma concêntrica a partir de um núcleo;
- II. **Corpos de Substituição:** Formados a partir da substituição de materiais preexistentes, onde quartzo e feldspato são os minerais mais abundantes;
- III. **Preenchimento de Fraturas:** Como o próprio nome diz, material intracrustal que preenche fraturas no pegmatito.

Adentrando ainda mais nessa classificação, as zonas de cristalização primária são divididas em outras quatro (Figura 3.2):

- I. **Núcleo:** Região central, de baixa variedade mineralógica, maciça e não necessariamente simétrica ao corpo pegmatítico como um todo. Minerais acessórios podem ser encontrados no núcleo ou no contato deste com a Zona Intermediária;
- II. **Zona Intermediária:** Mais próximo ao núcleo é comum encontrar microclima pertita em cristais gigantes, e turmalina em granada nas porções mais externas, próximas a Zona Mural. Daqui aparecem as maiores quantidades de berilo, espodumênio, urânio, tório, lítio, cério, nióbio, tântalo e ETR's, entre outros minerais acessórios.
- III. **Zona Mural:** Geralmente possui o maior volume em um corpo pegmatítico, por vezes encobrindo toda a parte superior, confundindo-se com um pegmatito homogêneo. Possui granulação grossa e é constituída, em sua maioria, por plagioclásio, pertita, quartzo, turmalina e muscovita;
- IV. **Zona de Borda:** Pouco espessa (geralmente em torno de 1 metro ou menos), caracterizada pela abundância de muscovita em placas bem desenvolvidas, associada a quartzo e feldspato. Os minerais acessórios mais comuns são cassiterita, afrisa e granada, porém suas presenças são pequenas.

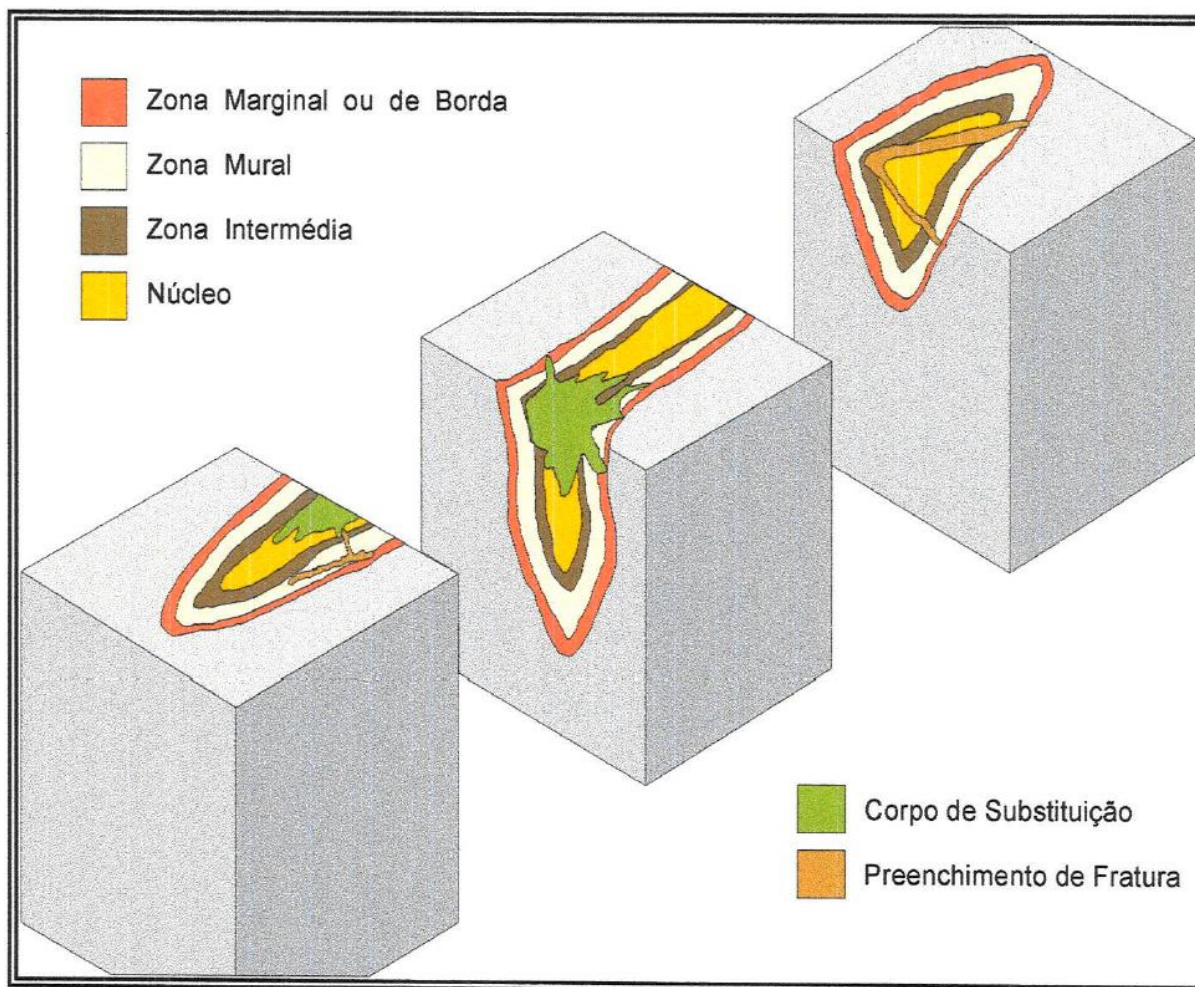


Figura 3.2 - Bloco diagrama idealizado mostrando as relações entre as três unidades estruturais dentro dos corpos pegmatíticos, e suas zonas. (Cameron *et al.* 1949, modificado por Gandini 1999).

Uma classificação que foi muito utilizada até o início dos anos 2000 é a de Ginsburg *et al.* (1979) que divide os corpos pegmatíticos conforme a sua profundidade de formação e suas características geológicas/petrográficas. Nesta divisão são apresentados quatro ambientes crustais de formação, que também equivalem aos quatro grupos de pegmatitos:

- I. **Pegmatitos Miarolíticos:** Ocorrem em granitos que intrudem rochas de baixo grau metamórfico, sob pressões de 1 à 2kbars, e em profundidades entre 1 e 6km. Podem apresentar enriquecimento em elementos como Be, Y, Ti, U, Th, terras raras, entre outros, e conter cavidades com fluorita óptica, quartzo, berilo e topázio com qualidades gemológicas, e etc.
- II. **Pegmatitos Portadores de Elementos Raros:** Ocorrem em profundidades que variam entre 3,5 e 7km. Valores mais altos de Li, Rb, Cs, Tl, Be, Nb-Ta, entre outros, são encontrados nessa porção. É grande o interesse nessa classe de pegmatitos, uma vez que não é raro encontrar minerais portadores de metais raros, em volume e condições que propiciam a viabilidade econômica para exploração dos mesmos.

- III. **Pegmatitos Muscovíticos:** Grandes depósitos de mica geralmente são formados nessa classe pegmatítica; já a presença de elementos raros é menos comum, ocorrendo de forma pontual. Formam-se em profundidades que variam de 7 à 11km, com pressões mais elevadas, entre 5 e 8kbars, e temperaturas que variam de 580 a 650°C. Segundo Sokolov *et al.* (1975), são originados de anatexia crustal e consolidam-se próximo ao foco de sua geração. Em sua maioria, são pegmatitos de simples complexidade estrutural, composicional e mineralógica.
- IV. **Pegmatitos Abissais:** Essa classe é a que ocorre nas maiores profundidades, superiores à 11km, com pressões médias de 4,9kbars e temperaturas entre 700 e 800°C. Presente em terrenos metamórficos de fácies anfibolito alto a granulito (Winkler 1977), não apresentando mineralizações com potencial econômico e nem relação espacial com granitos, contendo apenas, localmente e em baixa quantidade, allanita, monazita e coríndon.

Mais tarde, a fim de categorizar e atualizar a concepção desses autores, Černý (1991) reúne as informações dos pegmatitos graníticos em quatro classes e mais uma intermediária, sendo essa a “elementos raros/muscovita” (Quadro 3.1).

A classificação mais atual e completa para os pegmatitos é a de Černý & Ercit (2005), onde constam cinco classes, dez subclasses, quatorze tipos e sete subtipos, também tomando como base aspectos petrológicos de pegmatitos originados de plútons graníticos. As classes são as mesmas da tabela proposta por Černý (1991) (Quadro 3.1), porém surgem outras divisões que separam os pegmatitos em diferentes subcategorias.

Quadro 3.1 - Classificação de pegmatitos graníticos (Černý, 1991, adaptado por Castañeda, 1997).

MINERALIZAÇÃO				AMBIENTE METAMÓRFICO			RELAÇÃO COM GRANITOS		FEIÇÕES ESTRUTURAIS	
CLASSES	Elementos menores	Concentrações	Minerais	Fácies	Pressão (kb)	Temperatura (°C)	Tipo	Características	Encaixante	Ambiente tectônico
Abissal	U,Th, Zr,Nb, Ti,Y ETR,Mo	pobre ou moderada		anfíbrito alta a granulito de baixa-P a alta-P	~4 – 9	~700 – 800	nenhuma relação	os pegmatitos são segregações de leucossomas anatóticos	veios concordantes a mobilizados discordantes em gnaisses migmatitos, e charnockitos	faixas colisionais
Moscovita	Li,Be,Y ETR,TiU Th, Nb-Ta	pobre ou moderada	micas e minerais cerâmicos	Barroviano, anfíbrito de alta P, cianita sillimanita	~5 – 8	~660 – 580	nenhuma relação	corpos anatóticos	quase concordantes a discordantes em gnaisses migmatitos, xistos e quartzitos	faixas colisionais
E. r. / Muscovita	Misto entre os tipos muscovita e elementos raros		mineralizações também mistas	Barroviano, anfíbrito de média P, estauroilita-cianita-sillimanita	~4 – 6	~660 – 550	marginais internos	corpos residuais	quase concordantes a discordantes em xistos e quartzitos	faixas colisionais
Elementos raros	família LTC: Li,Rb, Cs,Be, Ga,Sn, Hf,F, Nb-Ta, B,P	pobre a abundante	gemíferos, minerais de Li, Be, etc.	Abukuma anfíbrito de baixa P, andaluzita sillimanita	~2 – 4	~660 – 500	externos, internos a marginais	granitos tipo-S principalmente	quase concordantes a discordantes em xistos e quartzitos	faixas colisionais
	família NYF: Y,REE,Li, U,Th, Zr,F, Nb-Ta	pobre a abundante	minerais cerâmicos	variável	variável	variável	internos a marginais	granitos tipo-A principalmente	<i>bolões</i> internos corpos marginais, ou discordantes ou concordantes em rochas diversas	ambientes extensionais, incluindo <i>rifts</i> abortados
Miarolítico	família NYF: Y,REE,Li, U,F, Th,Zr, Nb-Ta	pobres em gemas		rasos a sub-vulcânicos	~1 – 2		internos a marginais		<i>bolões</i> internos e diques	

CAPÍTULO 4

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

4.1 PROVÍNCIA BORBOREMA

A Província Borborema, assim nomeada por Almeida *et al.* (1977), é uma unidade geotectônica localizada na porção leste do Nordeste Brasileiro, limitada por diferentes sítios tectônicos. Entre eles, destacam-se o Cráton do São Francisco, à sul, a Bacia do Parnaíba, à oeste, e bacias sedimentares presentes à norte e leste da província, em regiões costeiras (Figura 4.1).

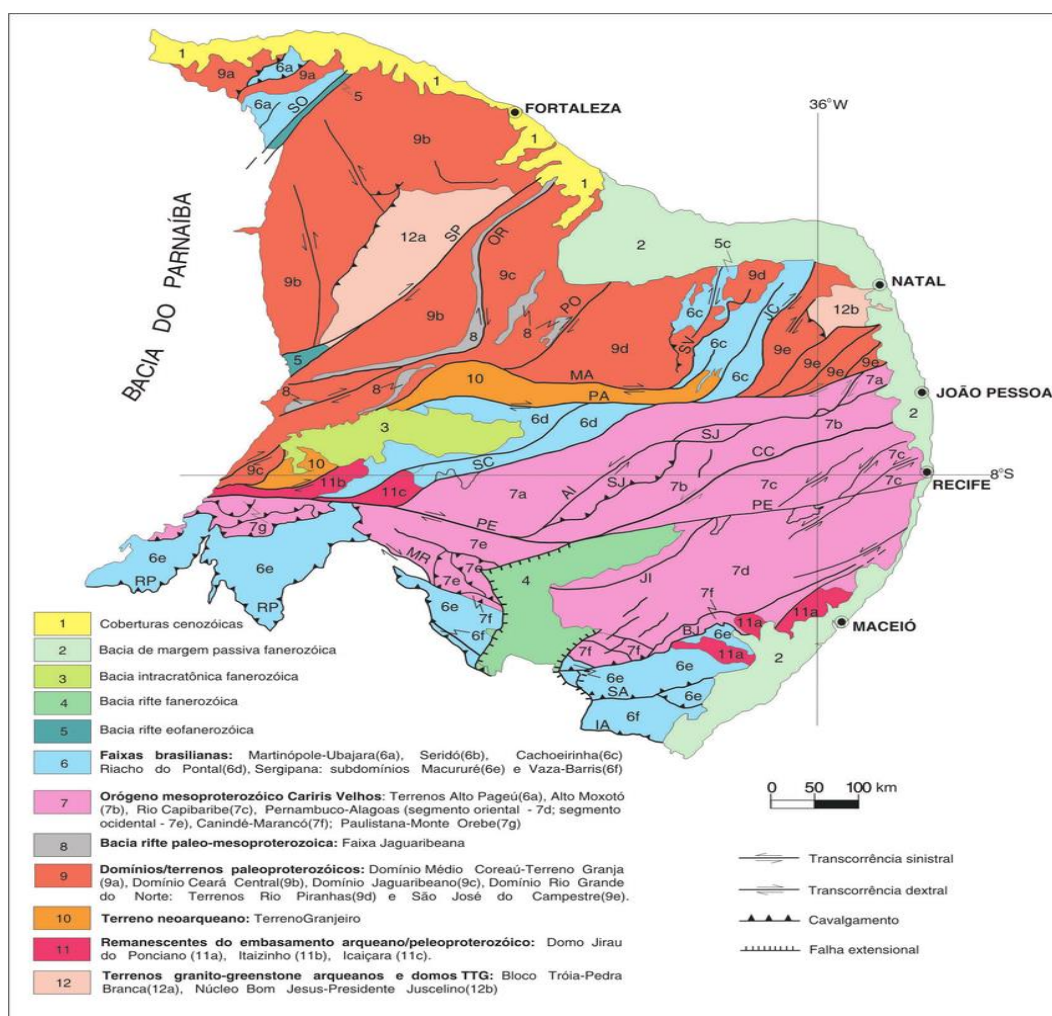


Figura 4.1 - Domínios tectônicos e principais estruturas da Província Borborema. Zonas de cisalhamento: Sobral–Pedro II (SO), Senador Pompeu (SP), Orós–Aiuaba (OR), Porto Alegre (PO), São Vicente (SV), Piauí–João Câmara (JC), Malta (MA), Serra do Caboclo (SC), Con Congo–Cruzeiro do Nordeste (CC), Serra da Jabitaca (SJ), Jatobá–Itaíba (JI), Macururé–Riacho Seco (MR), Belo Monte–Jeremoabo (BJ), São Miguel do Aleixo (SA) e Itaporanga (IA); Lineamentos: Patos (PA) e Pernambuco (PE); nappes a Faixa Riacho do Pontal (RP) (Fonte: Delgado *et al.* 2003)

Existem algumas explicações para o desenvolvimento do arcabouço tectônico da Província Borborema. Entre as teorias, NEVES (1975) propõe a segregação deste arcabouço em um cinturão de dobras estruturadas durante o Evento de Orogenia Brasileira, e áreas maciças estáveis. Uma outra hipótese, mais recente, sugere que ocorreram aglutinações de terrenos alóctones, o que explicaria a complexidade tectônica da região e sua aparente “sobreposição de orogenias” (Jardim de Sá *et al.* 1992, Santos *et al.* 2000). Por fim, há a hipótese de ocorrerem faixas ensiálicas dobradas, aonde a cobertura sedimentar neoproterozoica, depositada sobre o embasamento proveniente do arqueano e paleoproterozoico, sofreu deformação e metamorfização durante a Orogenia Brasileira (Neves *et al.* 2006). Existem aspectos comuns para todas as possíveis interpretações da evolução da província, e são eles:

- I. A presença de embasamentos paleoproterozoicos contendo dois núcleos arqueanos, um no Rio Grande do Norte (Dantas *et al.* 2004) e um no Ceará (Fetter *et al.* 2000);
- II. Formação de grabens associada à rifteamentos, gerando magmatismo e deposição de sedimentos na Faixa Orós-Jaguaribe, no início e decorrer do Mesoproterozoico (Sá *et al.* 1995); e também a presença de um segundo magmatismo, anorogênico, durante o Mesoproterozoico (Sá *et al.* 2002).
- III. Ao final do Mesoproterozoico, na Zona Transversal, ocorre magmatismo e deposição de sedimentos, marcada pelo evento Cariris Velhos.
- IV. Uma grande sequência de eventos relacionados a rifteamentos e deposição de sedimentos e de rochas vulcânicas, no Neoproterozoico; intrusões de granitóides interligadas a partir de zonas de cisalhamento. Tais eventos e estruturas relacionadas sofreram deformação e metamorfismo, gerando principalmente *nappes* em diversas porções da província, e marcam a Orogenia Brasileira.

4.2 DOMÍNIOS TECTÔNICOS DA PROVÍNCIA BORBOREMA

Mesmo com a existência de diferentes interpretações para a evolução da província, segundo Brito Neves *et al.* (2000), uma divisão de seus domínios tectônicos é aceita pela maioria dos pesquisadores: **DMC** - Domínio Médio Coreau, **DCC** - Domínio Ceará Central, **DRN** – Domínio Rio Grande do Norte, **DZT** – Domínio da Zona Transversal, e **DSE** – Domínio Sudeste (Figura 4.2).

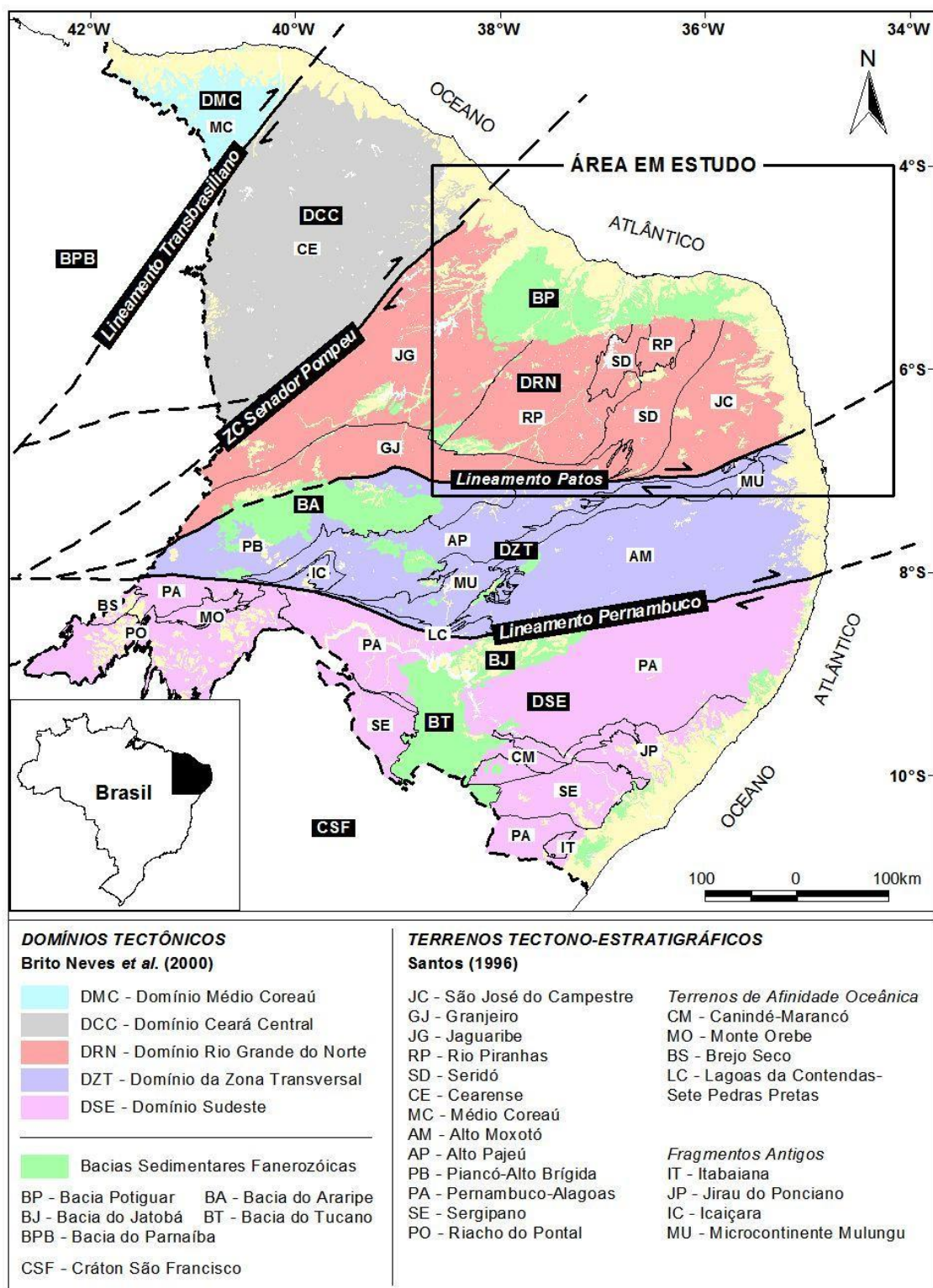


Figura 4.2 - Modelo de subdivisão tectônica da Província Borborema (modificado de Santos 1996, Brito Neves *et al.* 2000, CPRM 2001).

4.3 PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

Os pegmatitos presentes na Província Borborema podem ser encontrados em diversas localidades. No entanto, uma região específica dentro da província concentra a sua grande maioria. Devido a essa grande concentração, essa região passou a ser conhecida como “Província Pegmatítica da Borborema” (Figura 4.3).

A existência desses pegmatitos na província é conhecida há muitos anos. Uma de suas primeiras explorações foi para a retirada de mica durante a Primeira Guerra Mundial. Com o passar do tempo e chegada da Segunda Guerra Mundial, houve um retorno do interesse nesses pegmatitos na busca por elementos estratégicos, tais como Tântalo e Berilo.

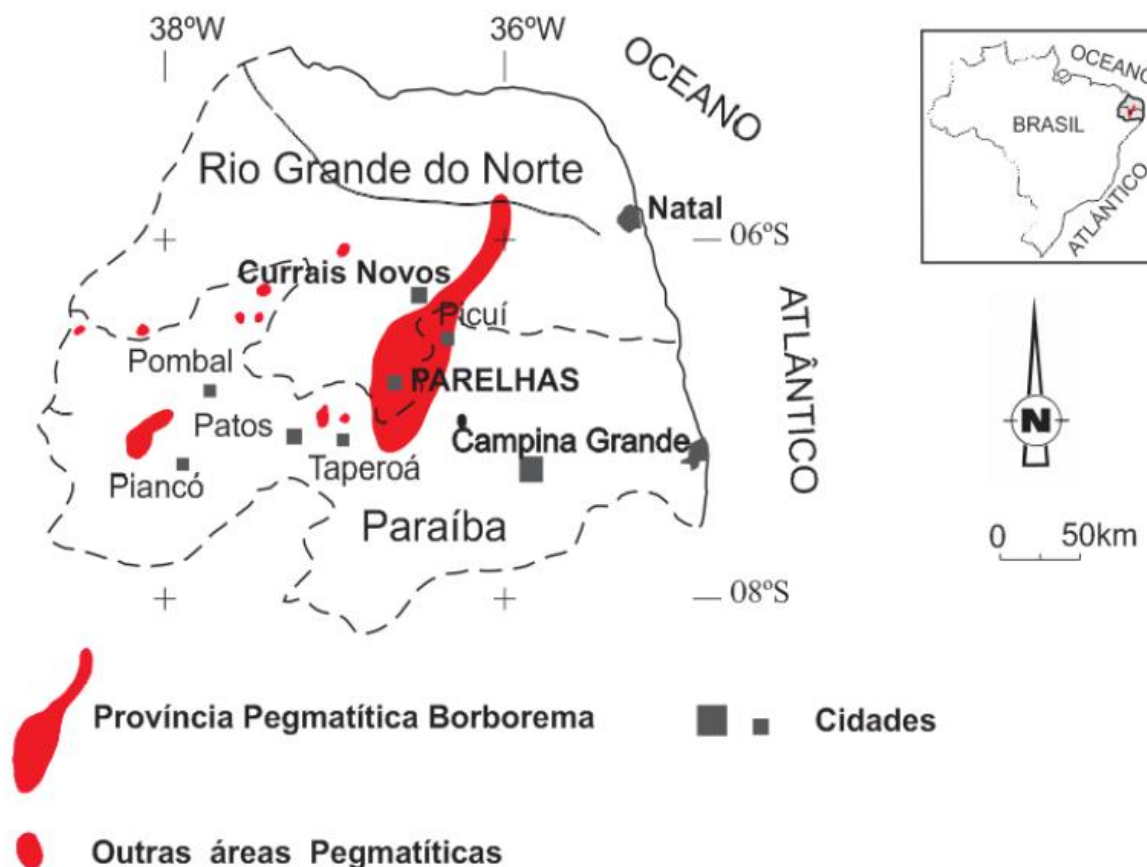


Figura 4.3 – Localização da Província Pegmatítica da Borborema e comparação com outras ocorrências pegmatíticas (Fonte: Viera 2016).

4.3.1 Contexto Geotectônico

A unidade geotectônica denominada Província Borborema é padronizada e dividida em cinturões dobrados e áreas estáveis, datadas do final do Pré-cambriano (NEVES, 1975). Quando se

leva em conta, especificamente, a Província Pegmatítica da Borborema, sua localização restringe-se à Faixa Seridó (FSe).

4.3.2 Faixa Seridó

As rochas do embasamento cristalino da FSe, denominado Complexo Caicó, têm idades arqueanas a paleoproterozoicas, e são constituídas por metassedimentos, migmatitos e, principalmente, ortogneisses.

Segundo Silva *et al.* (2010), o Grupo Seridó reúne as rochas da sequência supracrustal que sofreram deformação no Ciclo Brasiliano, e sua idade de deposição varia entre 650-610 Ma. Compreende as Formações Jucurutu (mármore e paragneisses, principalmente), Seridó (intercalação de cálcio-silicáticas, biotita xistos, mármore e anfibolitos) e Equador (intercalação de metagrauvacas com metaconglomerados e quartzitos) (Figura 4.4).

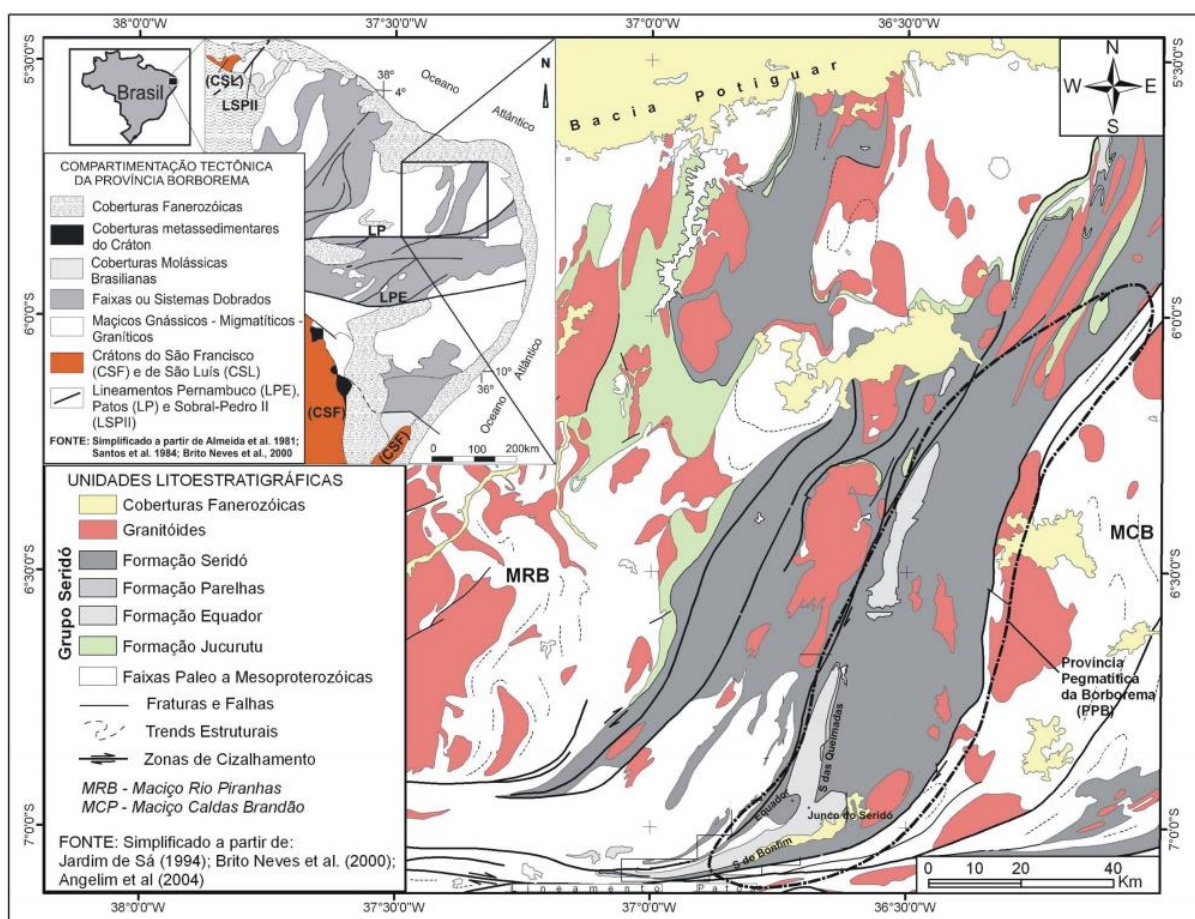


Figura 4.4 – Localização das Formações presentes no Grupo Seridó (Fonte: Silva *et al.* 2010).

CAPÍTULO 5

COLUMBITA-TANTALITA EM GEOCRONOLOGIA

Como já foi visto, os pegmatitos são rochas de grande interesse econômico e alvo de vários estudos. Entre eles, a datação é de grande importância para entender de forma assertiva sua geologia, formação e evolução. A série mineral coltan é representada por minerais acessórios presentes nos pegmatitos, e apresentam grande potencial para estudos geocronológicos. Por apresentarem quantidades de U e Pb indicadas para datação (alta e baixa concentração, respectivamente), estes minerais vem ganhando destaque na datação de corpos mineralizados associados a rochas pegmatíticas (Romer & Wright 1992; Romer & Smeds 1994; Romer & Lehmann 1995; Romer & Smeds 1996, 1997).

Sua utilização vem crescendo pois além de serem comuns nos pegmatitos, o método mais tradicional de datação dessas rochas, por U-Pb de zircões, pode muitas vezes sofrer interferências que dificultam sua precisão e utilização. Entre essas interferências, a presença de elevadas concentrações de U, Pb e Th nos zircões pode mascarar os dados reais de datação, uma vez que estes elementos afetam a estrutura interna dos cristais. Outro problema que pode ocorrer é a presença de um hidrotermalismo tardio que dissolva e recristalize os zircões, causando, desta forma, um desequilíbrio do sistema isotópico U-Pb, que acarreta em informações menos precisas de idade e formação da rocha (Deng *et al.* 2013; Vecchi 2015).

Ótimos resultados de datação com coltan vêm sido obtidos ao longo dos anos, em diversos trabalhos, tanto nacionais (principalmente na província pegmatítica da Borborema) quanto internacionais (diversos pegmatitos no mundo todo), como os de Moura (2013), Raslan (2014), Kashaba (2017), e Soares (2018). A utilização da coltan se mostra mais coerente e confiável do que a datação com zircão, comparação que foi realizada em alguns estudos destes autores. Como dito, o zircão é muito mais suscetível a processos que diminuem sua capacidade de gerar informações precisas acerca da idade da rocha. Além dos que já foram citados, pode-se falar também, segundo Romer e Lehman (1995), de amostras aluvionares ou coluvionares de ambientes intemperizados, onde não se pode afirmar se o zircão é proveniente da fonte, e, também, a coltan pode ocorrer em regiões onde a concentração de zircão é baixa ou que não serve para datação.

Como falado no primeiro capítulo deste trabalho, a fórmula química da solução-sólida columbita-tantalita é representada, de forma geral, da seguinte maneira: $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Nb}_2\text{O}_6]$ ou $[(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6]$. Segundo (Romer & Wright 1992) o elemento químico U tem a capacidade de substituir o Fe e o Mn na estrutura cristalina da coltan em altas temperaturas, diferente do Pb que geralmente não consegue.

Quando ocorre a diminuição dessa temperatura, o U é expulso da estrutura cristalina, sendo exsolvido, concentrado e isolado na forma de uraninita dentro do mineral. Este processo garante que o U fique estável uma vez que não interage com o meio externo, fazendo com que aumente a qualidade dos resultados de datação obtidos.

Datações U-Pb de columbita-tantalita por “*isotope dilution thermal ionization mass spectrometry*” (ID-TIMS) foram relatadas para vários contextos (ver em Romer e Wright, 1992; Romer e Lehmann, 1995; Romer e Smeds, 1994, 1996, 1997; Romer *et al.*, 1996; Oberthür *et al.*, 2002; Küster *et al.*, 2009; Dewaele *et al.*, 2011; Melcher *et al.*, 2015). A alta precisão da datação ID-TIMS de coltan é compensada por um protocolo de análise delicada e demorada. Dessa forma, técnicas *in situ* como “*laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry*” (LA-ICP-MS) tem sido cada vez mais usadas nos últimos 15 anos para datar minerais de columbita-tantalita (ver em Smith *et al.*, 2004; Dewaele *et al.*, 2011; Gäbler *et al.*, 2011; Melleton *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2013; Che *et al.*, 2015; Melcher *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2017; Van Lichtervelde *et al.*, 2017). Os resultados desses estudos indicam que LA-ICP-MS é um método apropriado para datar minerais de columbita-tantalita, apresentando menos de 5% de erro nas razões U-Pb calculadas (Che *et al.* 2015). A datação de coltan por espectrômetro de massa de íons secundários (SIMS) não foram relatados até o momento, embora esta técnica seja amplamente utilizada para datação U-Pb *in situ* de minerais.

A ampla gama de composições químicas dos minerais da série coltan pode afetar fortemente a precisão e a qualidade da datação U-Pb *in situ*, se não houver padrões químicos adequados disponíveis. Estudos baseados em ID-TIMS demonstraram que a coltan pode ter contribuição significativa de chumbo em inclusões de sulfeto e feldspato, e ocorrência de domínios metamíticos (Romer e Wright, 1992; Romer e Smeds, 1996, 1997; Müller *et al.*, 2017) , o que também pode representar uma grande desvantagem para a datação *in situ* se não for levado em consideração ou corrigido (Legros *et al.* 2019).

No momento, não há material de referência suficiente disponível para SIMS e análise LA-ICP-MS que cubra toda a faixa de composição da série coltan. As primeiras aplicações do LA-ICP-MS para a datação de columbita-tantalita usou minerais não matriciais como zircão ou monazita (Smith *et al.* 2004; Melleton *et al.* 2012).

Nos últimos anos, uma ferro-columbita chamada Coltan139 tem sido usada para padronização de minerais de columbita-tantalita de composições químicas variáveis (Gäbler *et al.* 2011; Melcher *et al.* 2015; Che *et al.* 2015). Che *et al.* (2015) sugeriram que não há efeitos matriciais significativos em U-Pb datando coltan de composição química diferente usando LA-ICP-MS e Coltan139.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

6.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

As amostras deste estudo foram chamadas de: 00; 073; 77; AM-101; AM-115; PEG-VON; PER 15d; PT099, totalizando oito amostras. Todas elas foram submetidas ao MEV através de imageamento por BSE, e análises químicas por EDS, em pontos que cobriam grande parte da sua superfície, linearmente. A análise química trouxe dados confiáveis de composição das amostras, gerando resultados satisfatórios quanto a sua química e mineralogia.

Duas das amostras (77 e PER 15d) mostraram não ser membros da série coltan. Uma terceira amostra (PT099) não apresenta o elemento Fe, porém esta é a única que mostra a presença de U. Para todas, exceto as amostras 77 e PER 15d, foram geradas tabelas contendo suas fórmulas químicas/estruturais, e diagramas para identificação da fase mineral. Essas fórmulas foram construídas a partir de uma planilha de Excel específica para este tipo de cálculo, cedida pelo orientador deste trabalho e usada em estudos como o de Vecci (2015), com um algoritmo que gera as proporções dos elementos com base em sua porcentagem na amostra e sua massa molecular.

A nomenclatura para columbita ou tantalita está relacionada com as quantidades dos elementos Nb e Ta presentes no mineral. Através da relação $Ta / (Ta + Nb)$ chamamos o mineral de columbita ou tantalita. Caso esta relação apresente resultado > 0.5 , a nomenclatura a ser empregada é tantalita. Se for < 0.5 , trata-se de uma columbita. Assim como para o Nb e Ta, é feito o mesmo cálculo de proporcionalidade para o Fe e o Mn. Caso a proporção $Mn / (Mn + Fe)$ seja > 0.5 , chama-se ferro-columbita ou ferro-tantalita. Se for < 0.5 , é chamado de mangano-columbita ou mangano-tantalita.

Existe ainda, segundo Lira (2016), um membro intermediário de magnésio para a columbita e tantalita, entretanto os resultados das análises das oito amostras deste trabalho trouxeram níveis insignificantes ou inexistentes de Mg.

6.1.1 Amostra "00"

Foram realizadas análises por EDS em seis pontos dessa amostra (Figura 6.2). Com exceção do ponto 001 (o mais afastado na figura 6.1), que tem uma porcentagem um pouco menor de Nb, todos mostram uma convergência e valores muito próximos em todos os elementos presentes, mostrando uma homogeneidade no mineral. A imagem BSE mostra uma série de fraturas por todo o mineral, com raras inclusões e poucas cavidades. A amostra 00 classifica-se como uma ferro-columbita, pelos seus elevados índices de Fe e Nb, em comparação com os níveis de Mn e Ta, como mostrado no diagrama abaixo (Figura 6.1).

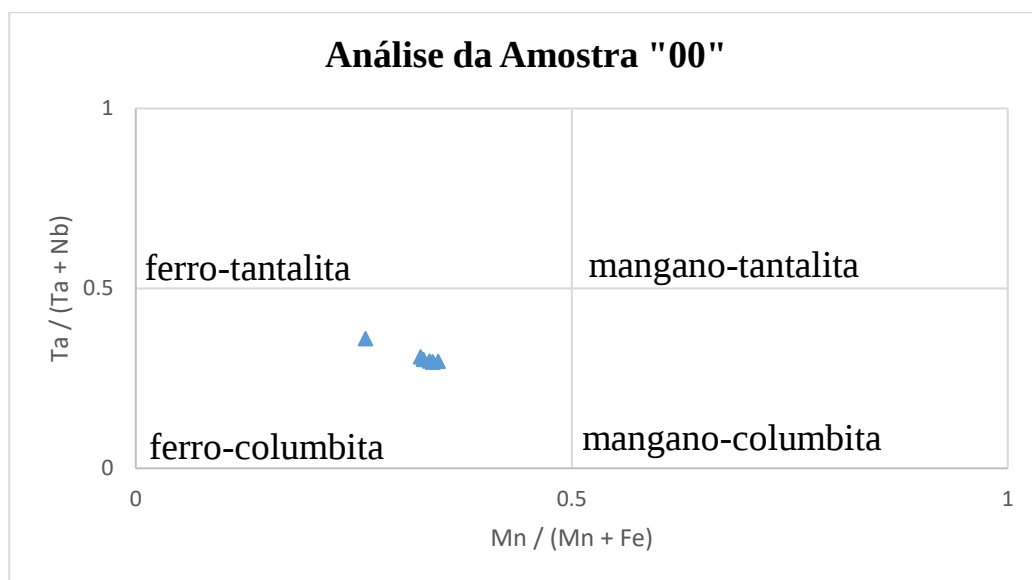
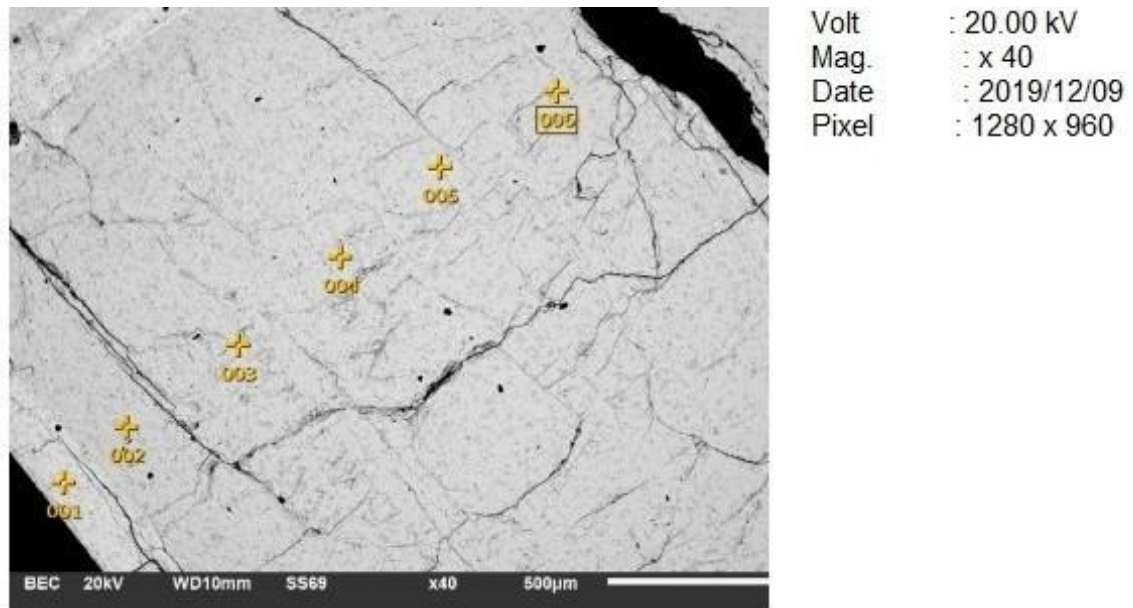


Figura 6.1 - Diagrama composicional da amostra 00. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.

Quadro 6.1 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra 00 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.

Ponto 001	$(\text{Fe}_{0,70}\text{Mn}_{0,25})_{\Sigma 0,95}(\text{Nb}_{1,28}\text{Ta}_{0,72}\text{Ti}_{0,02})_{\Sigma 2,02}\text{O}_6$
Ponto 002	$(\text{Fe}_{0,64}\text{Mn}_{0,33})_{\Sigma 0,97}(\text{Nb}_{1,36}\text{Ta}_{0,57}\text{Ti}_{0,09})_{\Sigma 2,02}\text{O}_6$
Ponto 003	$(\text{Fe}_{0,63}\text{Mn}_{0,31})_{\Sigma 0,94}(\text{Nb}_{1,36}\text{Ta}_{0,59}\text{Ti}_{0,09})_{\Sigma 2,04}\text{O}_6$
Ponto 004	$(\text{Fe}_{0,67}\text{Mn}_{0,34})_{\Sigma 1,01}(\text{Nb}_{1,34}\text{Ta}_{0,57}\text{Ti}_{0,1})_{\Sigma 2,01}\text{O}_6$
Ponto 005	$(\text{Fe}_{0,64}\text{Mn}_{0,33})_{\Sigma 0,97}(\text{Nb}_{1,36}\text{Ta}_{0,57}\text{Ti}_{0,1})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 006	$(\text{Fe}_{0,66}\text{Mn}_{0,35})_{\Sigma 1,01}(\text{Nb}_{1,35}\text{Ta}_{0,57}\text{Ti}_{0,1})_{\Sigma 2,02}\text{O}_6$
Média	$(\text{Fe}_{0,66}\text{Mn}_{0,32})_{\Sigma 0,98}(\text{Nb}_{1,34}\text{Ta}_{0,60}\text{Ti}_{0,08})_{\Sigma 2,02}\text{O}_6$



	O	TiO2	MnO	FeO	Nb2O5	Ta2O5
001	0.00	0.40	4.47	12.59	42.80	39.73
002	0.00	1.98	6.17	12.01	47.00	32.83
003	0.00	1.96	5.79	11.73	46.81	33.70
004	0.00	2.07	6.30	12.54	46.23	32.86
005	0.00	2.00	6.14	11.97	46.95	32.93
006	0.00	1.99	6.40	12.34	46.61	32.65
Average	0.00	1.73	5.88	12.20	46.07	34.12
Standard deviation	0.00	0.11	0.21	0.21	0.06	0.22

Figura 6.2 - Composição química e imagem BSE da amostra 00 resultantes da análise em MEV.

6.1.2 Amostra “073”

Foram realizadas análises por EDS em seis pontos dessa amostra (Figura 6.4). A imagem BSE mostra fraturas quase paralelas em sua maioria, com poucas cavidades e raras inclusões. Em todos os pontos da amostra 073 as porcentagens de elementos são quase iguais, o que explica a concentração dos pontos no diagrama abaixo (Figura 6.3). Devido aos seus elevados índices de Fe e Nb, em comparação com os níveis de Mn e Ta, a amostra é classificada como ferro-columbita.

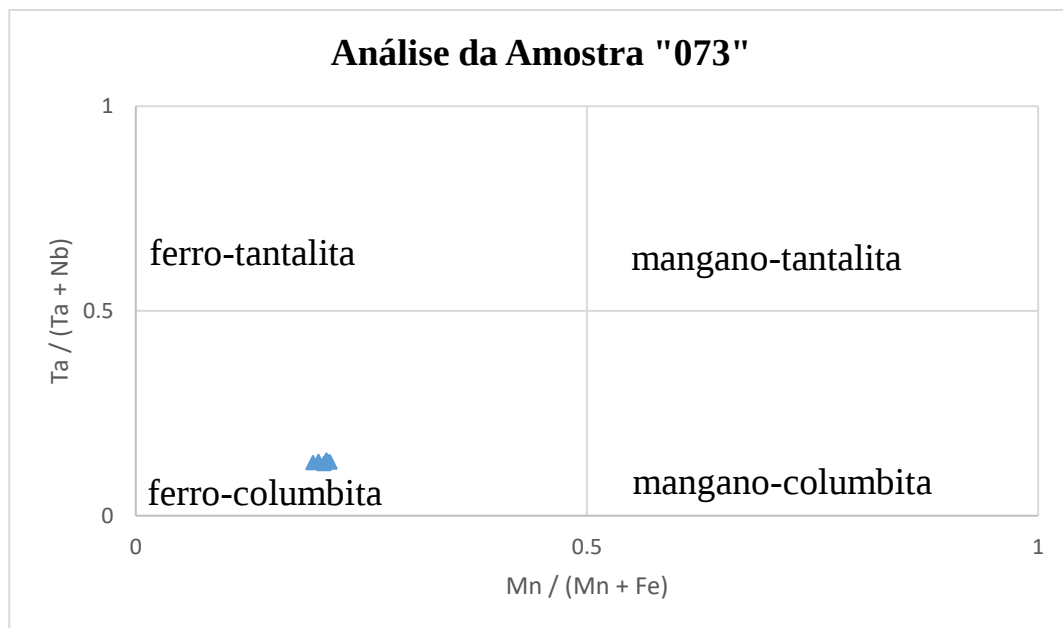
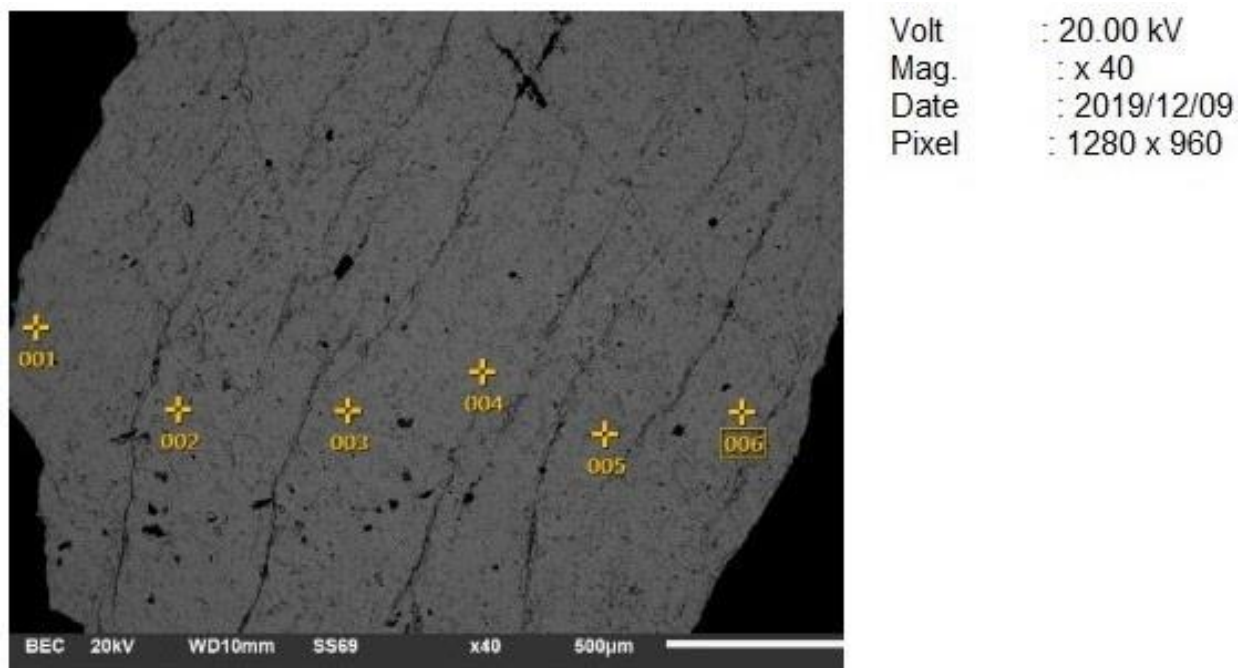


Figura 6.3 - Diagrama composicional da amostra 073. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.

Quadro 6.2 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra 073 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.

Ponto 001	$(\text{Fe}_{0,75}\text{Mn}_{0,19})_{\Sigma 0,94}(\text{Nb}_{1,70}\text{Ta}_{0,26}\text{Ti}_{0,07})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 002	$(\text{Fe}_{0,73}\text{Mn}_{0,20})_{\Sigma 0,93}(\text{Nb}_{1,72}\text{Ta}_{0,26}\text{Ti}_{0,05})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 003	$(\text{Fe}_{0,82}\text{Mn}_{0,20})_{\Sigma 1,02}(\text{Nb}_{1,68}\text{Ta}_{0,25}\text{Ti}_{0,06})_{\Sigma 1,99}\text{O}_6$
Ponto 004	$(\text{Fe}_{0,76}\text{Mn}_{0,20})_{\Sigma 0,96}(\text{Nb}_{1,71}\text{Ta}_{0,25}\text{Ti}_{0,07})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 005	$(\text{Fe}_{0,74}\text{Mn}_{0,20})_{\Sigma 0,94}(\text{Nb}_{1,71}\text{Ta}_{0,26}\text{Ti}_{0,06})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 006	$(\text{Fe}_{0,71}\text{Mn}_{0,19})_{\Sigma 0,90}(\text{Nb}_{1,72}\text{Ta}_{0,27}\text{Ti}_{0,06})_{\Sigma 2,05}\text{O}_6$
Média	$(\text{Fe}_{0,75}\text{Mn}_{0,20})_{\Sigma 0,95}(\text{Nb}_{1,71}\text{Ta}_{0,26}\text{Ti}_{0,06})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$



Acquisition Condition
 Instrument : 6010LA
 Volt : 20.00 kV
 Current : ---
 Process Time : T1
 Live time : 30.00 sec.
 Real Time : 38.32 sec.
 DeadTime : 22.00 %
 Count Rate : 63184.00 CPS

	O	TiO ₂	MnO	FeO	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	
001	0.00	1.71	3.76	15.14	63.11	16.28	
002	0.00	1.18	3.89	14.67	64.11	16.15	
003	0.00	1.52	4.13	16.44	62.18	15.74	
004	0.00	1.30	4.08	15.34	63.85	15.43	
005	0.00	1.33	3.91	14.91	63.72	16.13	
006	0.00	1.30	3.82	14.26	64.00	16.63	
Average	0.00	1.39	3.93	15.13	63.49	16.06	
Standard deviation	0.00	0.04	0.05	0.05	0.35	0.21	0.23

Figura 6.4 - Composição química e imagem BSE da amostra 073 resultantes da análise em MEV.

6.1.3 Amostra “77”

O mineral trata-se de um aluminossilicato, com porções de feldspato potássico. A análise foi realizada nas diferentes porções de cores que a amostra apresenta, afim de determinar possíveis inclusões ou um agregado de diferentes minerais. As porções apresentaram, separadamente, o feldspato potássico com baixa porcentagem de Fe (pontos 001 e 002); pequenas porcentagens de Na e Mg, com altos índices de Fe (pontos 003 e 004); e Al e Si exclusivamente, nas porções mais escuras da imagem (ponto 006). Em todos os locais da amostra, exceto no ponto 005, predominam em maioria quase absoluta, o Al e Si (Figura 6.5).

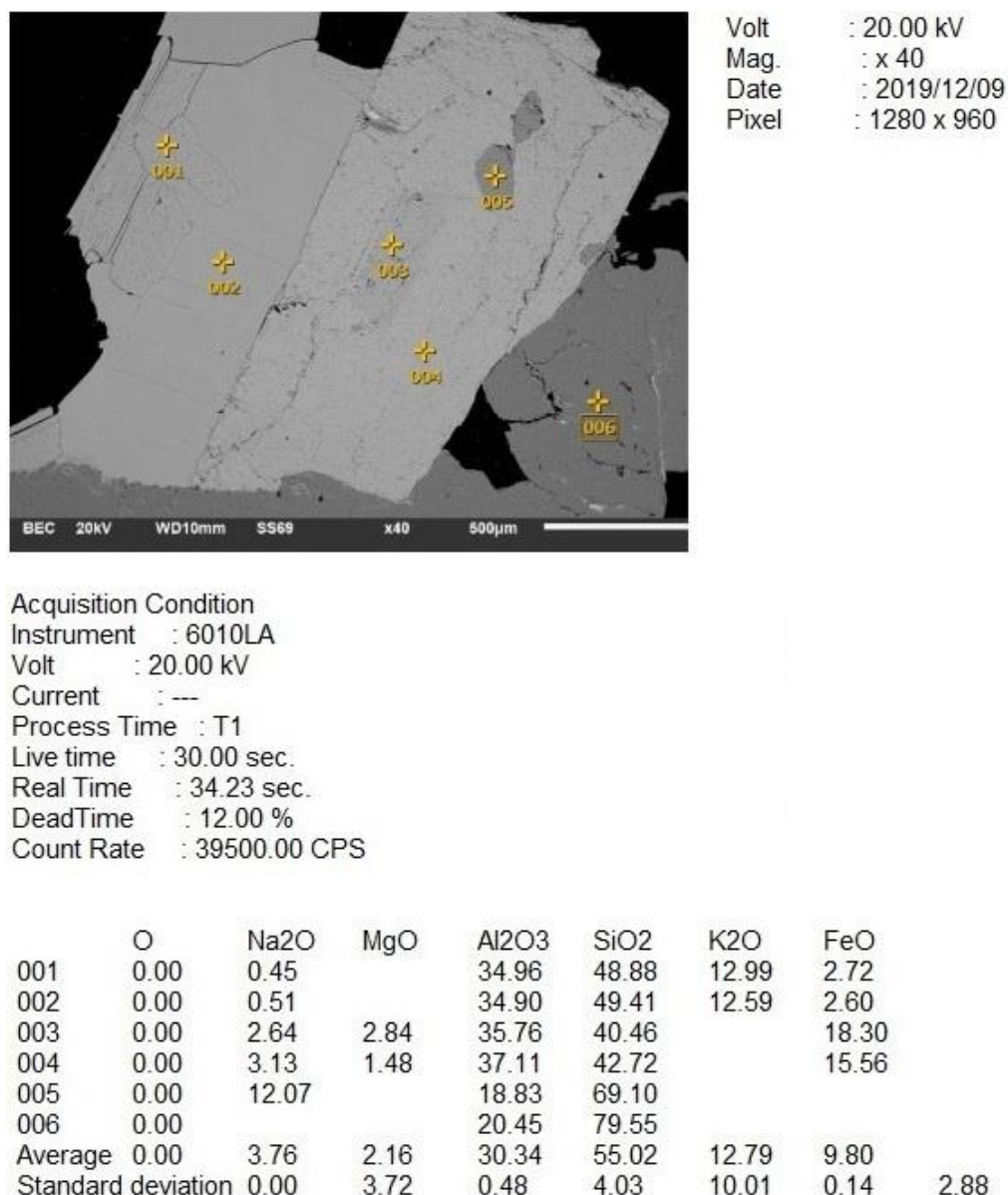


Figura 6.5 - Composição química e imagem BSE da amostra 77 resultantes da análise em MEV.

6.1.4 Amostra “AM-101”

Foram realizadas análises por EDS em seis pontos dessa amostra (Figura 6.7). Assim como na análise da amostra “073”, as porcentagens dos elementos presentes no mineral são quase homogêneas em todos os pontos, o que é evidenciado abaixo (Figura 6.6). Sua composição com elevados índices de Mn e Ta, em comparação com os níveis de Fe e Nb, nos indicam que se trata de uma mangano-tantalita. A imagem BSE mostra fraturas em direções aleatórias, com poucas cavidades e raras inclusões.

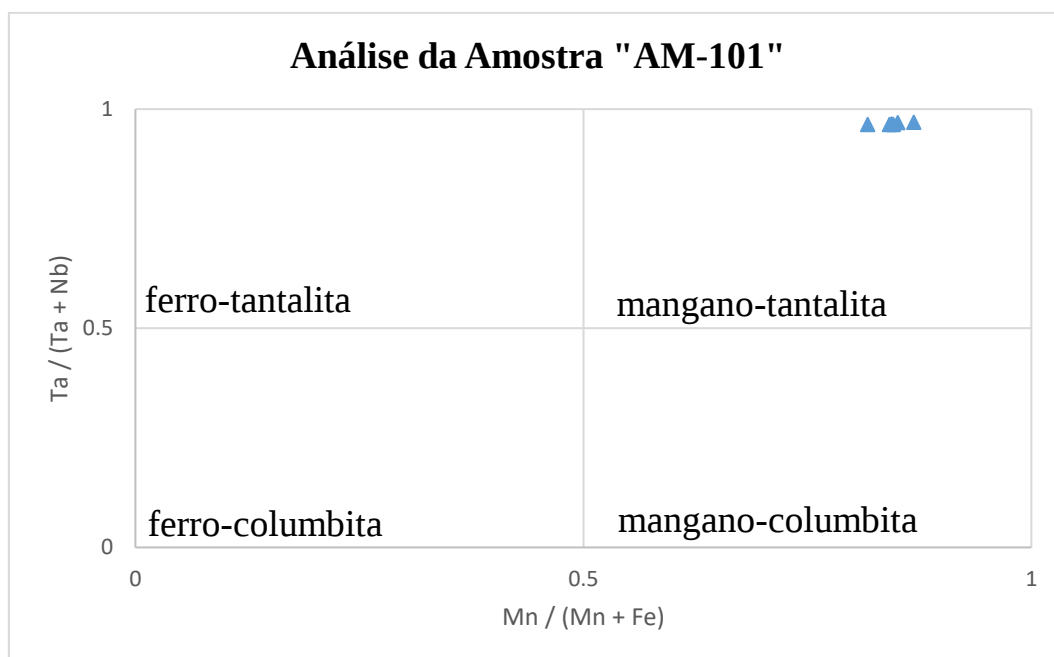
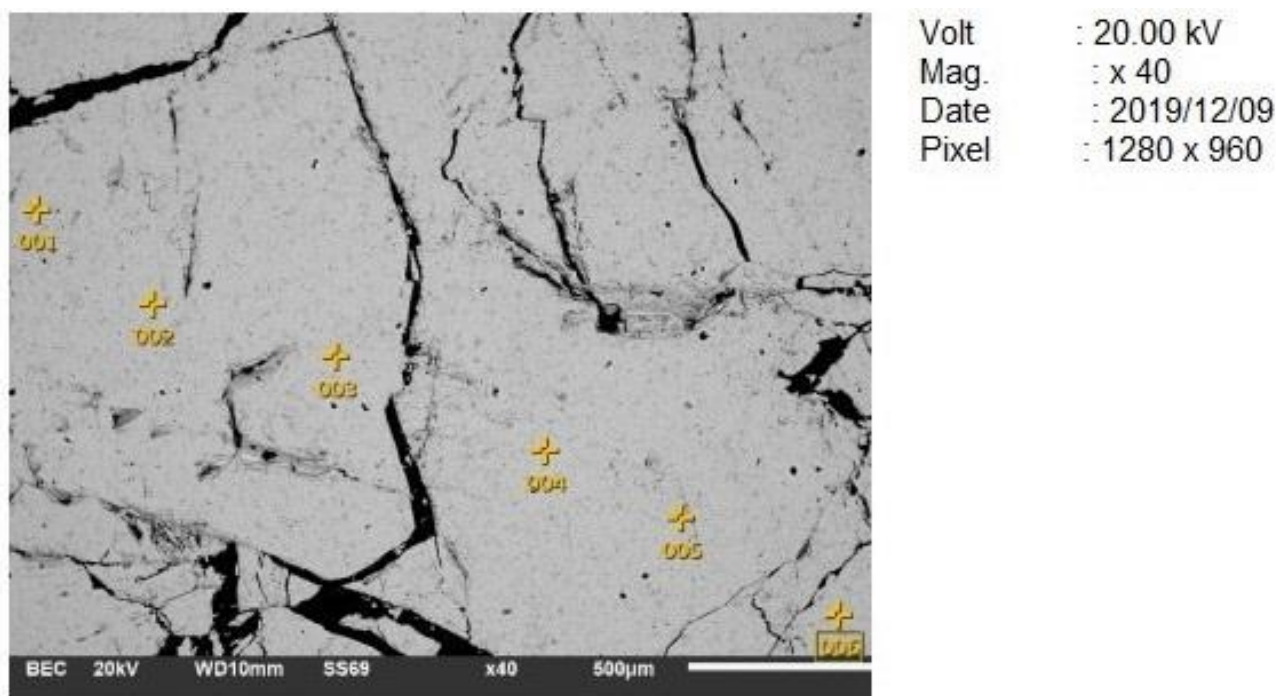


Figura 6.6 - Diagrama composicional da amostra AM-101. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como mangano-tantalita.

Quadro 6.3 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra AM-101 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005, 006 e a média entre eles.

Ponto 001	$(\text{Fe}_{0,13}\text{Mn}_{0,86})_{\Sigma 0,99}(\text{Nb}_{0,06}\text{Ta}_{1,94})_{\Sigma 2,00}\text{O}_6$
Ponto 002	$(\text{Fe}_{0,15}\text{Mn}_{0,81})_{\Sigma 0,98}(\text{Nb}_{0,07}\text{Ta}_{1,94})_{\Sigma 2,01}\text{O}_6$
Ponto 003	$(\text{Fe}_{0,14}\text{Mn}_{0,76})_{\Sigma 0,90}(\text{Nb}_{0,07}\text{Ta}_{1,96})_{\Sigma 2,03}\text{O}_6$
Ponto 004	$(\text{Fe}_{0,17}\text{Mn}_{0,97})_{\Sigma 1,14}(\text{Nb}_{0,06}\text{Ta}_{1,88})_{\Sigma 1,94}\text{O}_6$
Ponto 005	$(\text{Fe}_{0,19}\text{Mn}_{0,85})_{\Sigma 1,09}(\text{Nb}_{0,07}\text{Ta}_{1,91})_{\Sigma 1,98}\text{O}_6$
Ponto 006	$(\text{Fe}_{0,16}\text{Mn}_{0,88})_{\Sigma 0,98}(\text{Nb}_{0,07}\text{Ta}_{1,91})_{\Sigma 1,98}\text{O}_6$
Média	$(\text{Fe}_{0,16}\text{Mn}_{0,85})_{\Sigma 1,01}(\text{Nb}_{0,07}\text{Ta}_{1,93})_{\Sigma 2,00}\text{O}_6$



Acquisition Condition
Instrument : 6010LA
Volt : 20.00 kV
Current : ---
Process Time : T1
Live time : 30.00 sec.
Real Time : 38.58 sec.
DeadTime : 22.00 %
Count Rate : 61240.00 CPS

	O	MnO	FeO	Nb2O5	Ta2O5
001	0.00	11.98	1.90	1.58	84.53
002	0.00	11.33	2.01	1.93	84.72
003	0.00	10.64	1.96	2.08	85.33
004	0.00	13.60	2.39	1.70	82.31
005	0.00	11.92	2.69	1.92	83.47
006	0.00	12.31	2.33	1.71	83.65
Average	0.00	11.96	2.21	1.82	84.00
Standard deviation	0.00		0.14	0.05	0.05

Figura 6.7 - Composição química e imagem BSE da amostra AM-101 resultantes da análise em MEV.

6.1.5 Amostra “AM-115”

A análise química EDS dessa amostra, assim como algumas anteriores, mostra composições químicas muito semelhantes em todos os cinco pontos (Figura 6.9), o que é evidenciado pelos pontos extremamente próximos no diagrama abaixo (Figura 6.8). Sua composição com elevados índices de Fe e Nb, em comparação com os níveis de Mn e Ta, nos indicam que se trata de uma ferro-columbita. A imagem BSE mostra poucas fraturas, inclusões e cavidades.

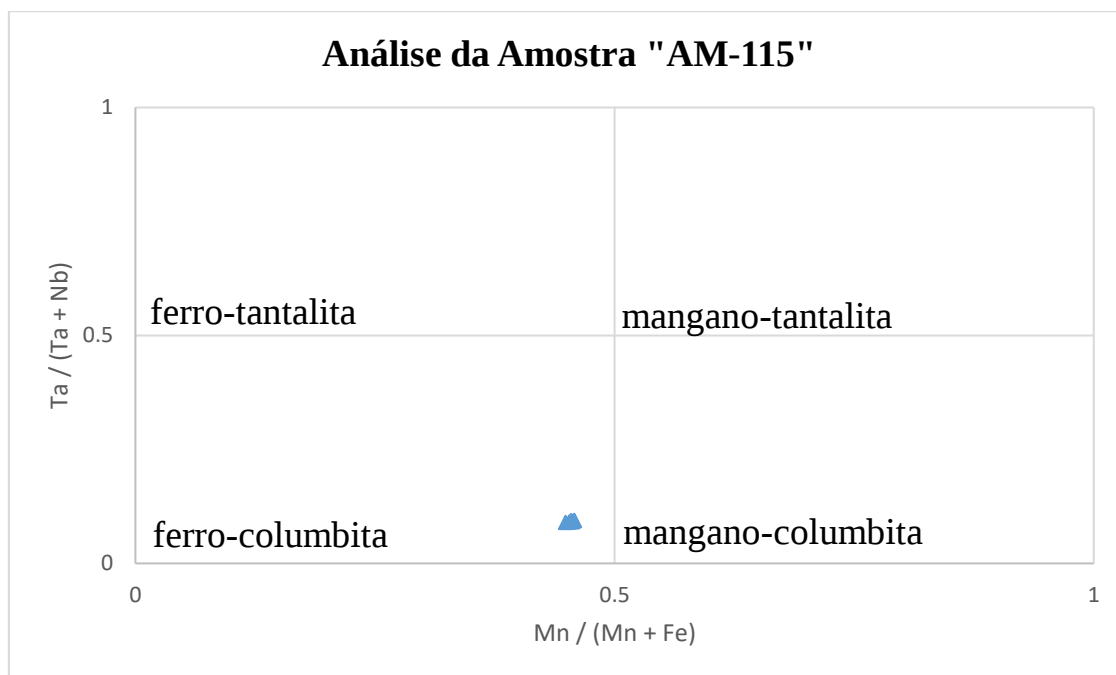
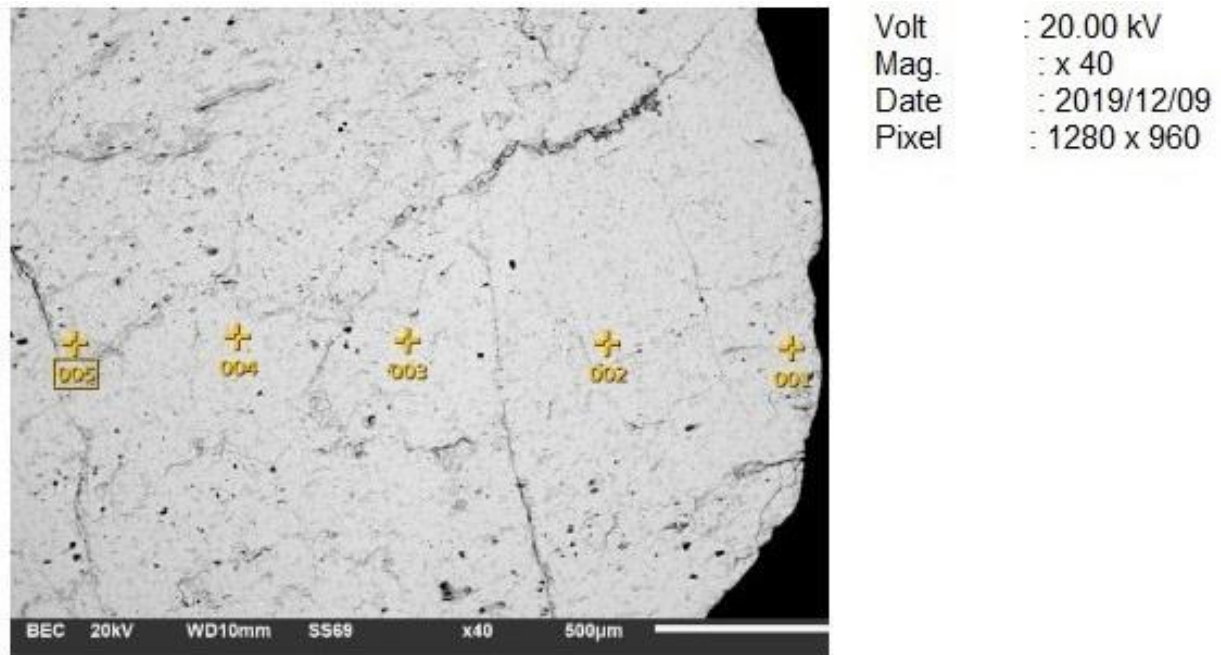


Figura 6.8 - Figura 6.8 - Diagrama composicional da amostra AM-115. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-columbita.

Quadro 6.4 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra AM-115 nos pontos 001, 002, 003, 004, 005 e a média entre eles.

Ponto 001	$(\text{Fe}_{0,52}\text{Mn}_{0,44})\Sigma_{0,96}(\text{Nb}_{1,73}\text{Ta}_{0,18}\text{Ti}_{0,13})\Sigma_{2,04}\text{O}_6$
Ponto 002	$(\text{Fe}_{0,54}\text{Mn}_{0,45})\Sigma_{0,99}(\text{Nb}_{1,73}\text{Ta}_{0,18}\text{Ti}_{0,12})\Sigma_{2,03}\text{O}_6$
Ponto 003	$(\text{Fe}_{0,69}\text{Mn}_{0,57})\Sigma_{1,26}(\text{Nb}_{1,61}\text{Ta}_{0,16}\text{Ti}_{0,15})\Sigma_{1,92}\text{O}_6$
Ponto 004	$(\text{Fe}_{0,51}\text{Mn}_{0,43})\Sigma_{0,94}(\text{Nb}_{1,73}\text{Ta}_{0,18}\text{Ti}_{0,13})\Sigma_{2,04}\text{O}_6$
Ponto 005	$(\text{Fe}_{0,54}\text{Mn}_{0,44})\Sigma_{0,98}(\text{Nb}_{1,72}\text{Ta}_{0,17}\text{Ti}_{0,14})\Sigma_{2,03}\text{O}_6$
Média	$(\text{Fe}_{0,56}\text{Mn}_{0,47})\Sigma_{1,03}(\text{Nb}_{1,70}\text{Ta}_{0,17}\text{Ti}_{0,14})\Sigma_{2,01}\text{O}_6$



Acquisition Condition
 Instrument : 6010LA
 Volt : 20.00 kV
 Current : ---
 Process Time : T1
 Live time : 30.00 sec.
 Real Time : 38.49 sec.
 DeadTime : 23.00 %
 Count Rate : 63468.00 CPS

	O	TiO2	MnO	FeO	Nb2O5	Ta2O5	
001	0.00	3.07	8.96	10.80	65.85	11.32	
002	0.00	2.69	9.18	11.09	65.83	11.21	
003	0.00	3.42	11.57	14.05	60.68	10.28	
004	0.00	3.12	8.72	10.58	66.13	11.45	
005	0.00	3.18	9.00	11.14	65.75	10.93	
Average	0.00	3.10	9.49	11.53	64.85	11.04	
Standard deviation	0.00	0.04	0.22	0.18	0.41	0.05	

Figura 6.9 - Composição química e imagem BSE da amostra AM-115 resultantes da análise em MEV.

6.1.6 Amostra “PEG-VON”

As análises químicas EDS do mineral (Figura 6.11) nos mostram concentrações homogêneas de Ta, Nb, Fe e Mn em todos os pontos da amostra. Essa característica é bem evidenciada pelo diagrama abaixo (Figura 6.10), onde todos os pontos estão extremamente próximos. As altas porcentagens de Fe e Ta, em relação aos elementos Mn e Nb, nos indicam que o mineral se trata de um ferro-tantalita. A imagem BSE da amostra algumas inclusões e pequenas cavidades, e quase nenhuma fratura.

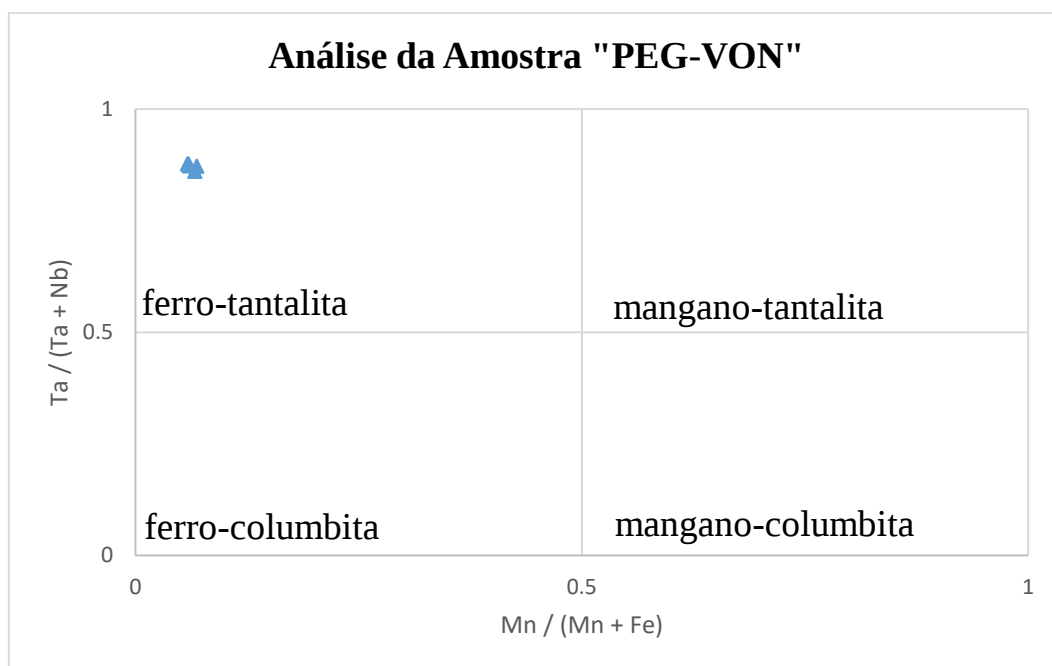
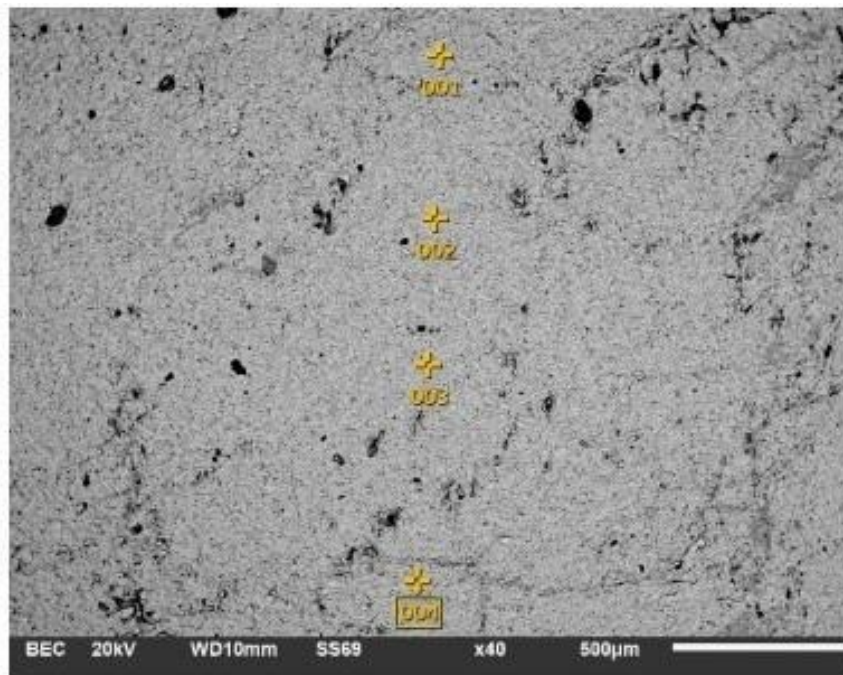


Figura 6.10 - Diagrama composicional da amostra PEG-VON. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como ferro-tantalita.

Quadro 6.5 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra PEG-VON nos pontos 001, 002, 003, 004 e a média entre eles.

Ponto 001	$(\text{Fe}_{0,97}\text{Mn}_{0,06})_{\Sigma 01,03}(\text{Nb}_{0,24}\text{Ta}_{1,71}\text{Ti}_{0,04})_{\Sigma 1,99}\text{O}_6$
Ponto 002	$(\text{Fe}_{0,84}\text{Mn}_{0,06})_{\Sigma 0,90}(\text{Nb}_{0,28}\text{Ta}_{1,73}\text{Ti}_{0,03})_{\Sigma 2,04}\text{O}_6$
Ponto 003	$(\text{Fe}_{0,95}\text{Mn}_{0,07})_{\Sigma 1,02}(\text{Nb}_{0,25}\text{Ta}_{1,71}\text{Ti}_{0,04})_{\Sigma 2,00}\text{O}_6$
Ponto 004	$(\text{Fe}_{0,95}\text{Mn}_{0,06})_{\Sigma 1,01}(\text{Nb}_{0,24}\text{Ta}_{1,71}\text{Ti}_{0,05})_{\Sigma 2,00}\text{O}_6$
Média	$(\text{Fe}_{0,93}\text{Mn}_{0,06})_{\Sigma 0,99}(\text{Nb}_{0,25}\text{Ta}_{1,72}\text{Ti}_{0,04})_{\Sigma 2,01}\text{O}_6$



Volt : 20.00 kV
Mag. : x 40
Date : 2019/12/09
Pixel : 1280 x 960

Acquisition Condition
Instrument : 6010LA
Volt : 20.00 kV
Current : ---
Process Time : T1
Live time : 30.00 sec.
Real Time : 39.62 sec.
DeadTime : 25.00 %
Count Rate : 67941.00 CPS

	O	TiO2	MnO	FeO	Nb2O5	Ta2O5	
001	0.00	0.68	0.87	14.35	6.51	77.58	
002	0.00	0.60	0.84	12.46	7.72	78.38	
003	0.00	0.65	0.96	14.04	6.72	77.63	
004	0.00	0.77	0.90	14.08	6.56	77.69	
Average	0.00	0.68	0.89	13.73	6.88	77.82	
Standard deviation	0.00	0.00	0.05	0.00	0.17	0.16	0.06

Figura 6.11 - Composição química e imagem BSE da amostra PEG-VON resultantes da análise em MEV.

6.1.7 Amostra “PER 15d”

A análise química EDS desse mineral (Figura 6.12) mostra que ele apresenta em sua fórmula química, em todos os pontos, apenas óxidos de Ti e Sn (TiO_2 e SnO_2), sendo que o estanho representa, em todas as regiões da análise, quase 100% da composição. Dessa forma, a amostra classifica-se como o mineral cassiterita, e não faz parte do grupo de minerais de interesse deste estudo.

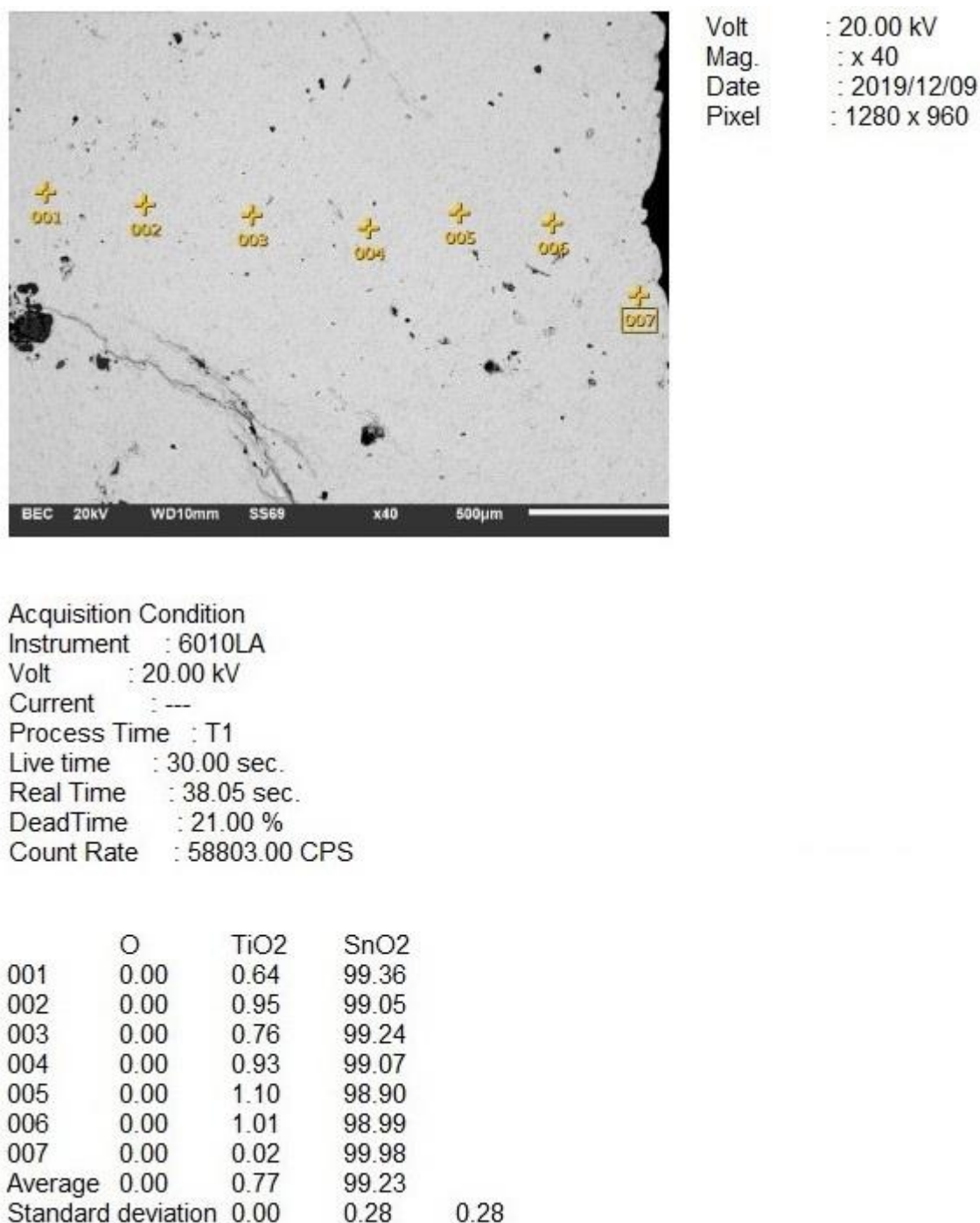


Figura 6.12 - Composição química e imagem BSE da amostra PER 15d resultantes da análise em MEV.

6.1.8 Amostra "PT099"

A análise química EDS realizada nesse mineral mostra uma variação de Ta de cerca de 2~3% de um ponto para o outro (Figura 6.14), e inexistência de Fe, o que explica o comportamento dos pontos na imagem abaixo (Figura 6.13). Além disso, dentre todas as amostras do presente estudo, essa é a única que apresenta urânio em sua composição, o que é ideal para análises de geocronologia. O urânio encontra-se disseminado como mostrado na análise química, em todos os pontos. Sua composição com elevados índices de Mn e Nb, em comparação com os níveis de Ta, nos indicam que se trata de uma mangano-tantalita. A imagem BSE mostra poucas fraturas e inclusões, e uma quantidade significativa de cavidades, sendo que alguns tem dimensão expressiva.

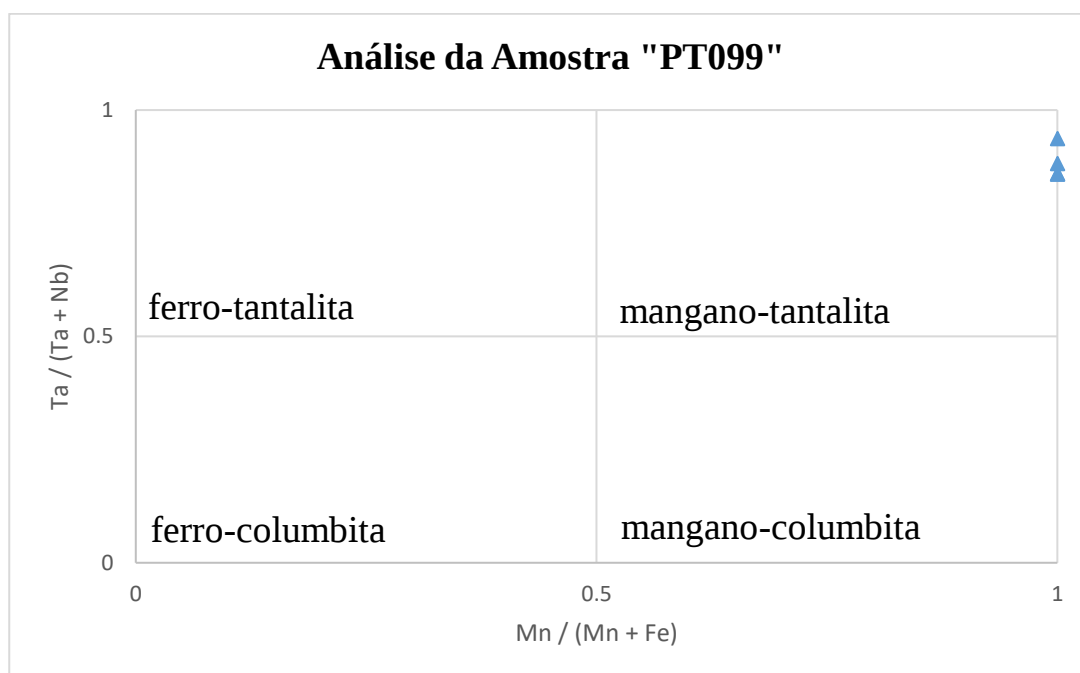
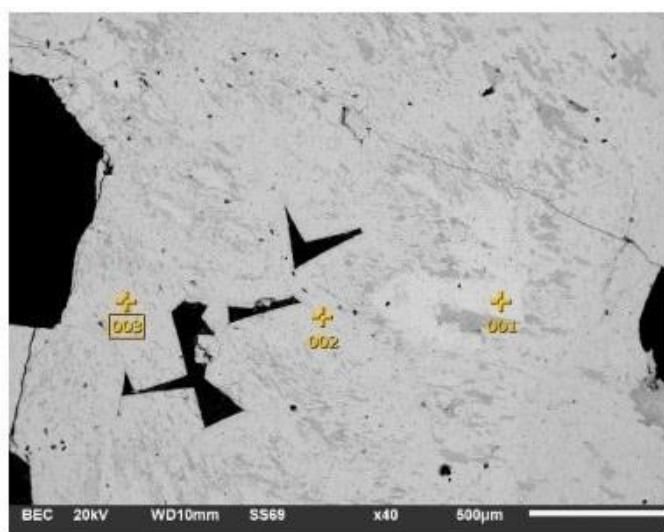


Figura 6.13 - Diagrama composicional da amostra PT099. Levando em conta as relações de Ta e Nb, e Mn e Fe, o mineral é classificado como mangano-tantalita.

Quadro 6.6 - Fórmulas químicas aproximadas da amostra PT099 nos pontos 001, 002, 003 e a média entre eles.

Ponto 001	$\text{Mn}(\text{Ta}_{2,08}\text{Nb}_{0,14}) \Sigma_{2,22}\text{O}_6$
Ponto 002	$\text{Mn}(\text{Ta}_{2,08}\text{Nb}_{0,14}) \Sigma_{2,22}\text{O}_6$
Ponto 003	$\text{Mn}(\text{Ta}_{2,08}\text{Nb}_{0,14}) \Sigma_{2,22}\text{O}_6$
Média	$\text{Mn}(\text{Ta}_{2,08}\text{Nb}_{0,14}) \Sigma_{2,22}\text{O}_6$



Volt : 20.00 kV
Mag. : x 40
Date : 2019/12/09
Pixel : 1280 x 960

Acquisition Condition
Instrument : 6010LA
Volt : 20.00 kV
Current : ---
Process Time : T1
Live time : 30.00 sec.
Real Time : 40.82 sec.
DeadTime : 27.00 %
Count Rate : 75136.00 CPS

	CaO	O	F	Na2O	TiO2	MnO	Nb2O5	Ta2O5	U3O8	
001	10.22	0.00	0.78	1.15	2.57	0.39	2.96	72.96	8.97	
002	12.55	0.00	0.96	0.92	3.11	0.66	6.88	70.28	4.64	
003	7.99	0.00	0.67	0.65	3.46	0.50	7.46	74.09	5.18	
Average	10.25	0.00	0.80	0.91	3.05	0.52	5.77	72.44	6.26	
Standard deviation	1.31	0.00	0.00	0.08	0.15	0.24	0.01	0.98	0.95	0.63

Figura 6.14 - Composição química e imagem BSE da amostra PT099 resultantes da análise em MEV.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÕES E CONSLUSÕES

A título de comparação de quantidades de Fe e Mn, e Ta e Nb, foi construído um diagrama composicional geral (Figura 7.1), contendo todas as amostras que se mostraram pertencentes a série coltan. Todas as columbitas se enquadram no membro Fe, e, com exceção da amostra PEG-VON, todas as tantalitas, no membro Mn. Isso pode significar que as amostras estão presentes em diferentes etapas de diferenciação dentro do pegmatito, com um enriquecimento de Mn à medida que aumentam os índices de Ta, e vice-versa.

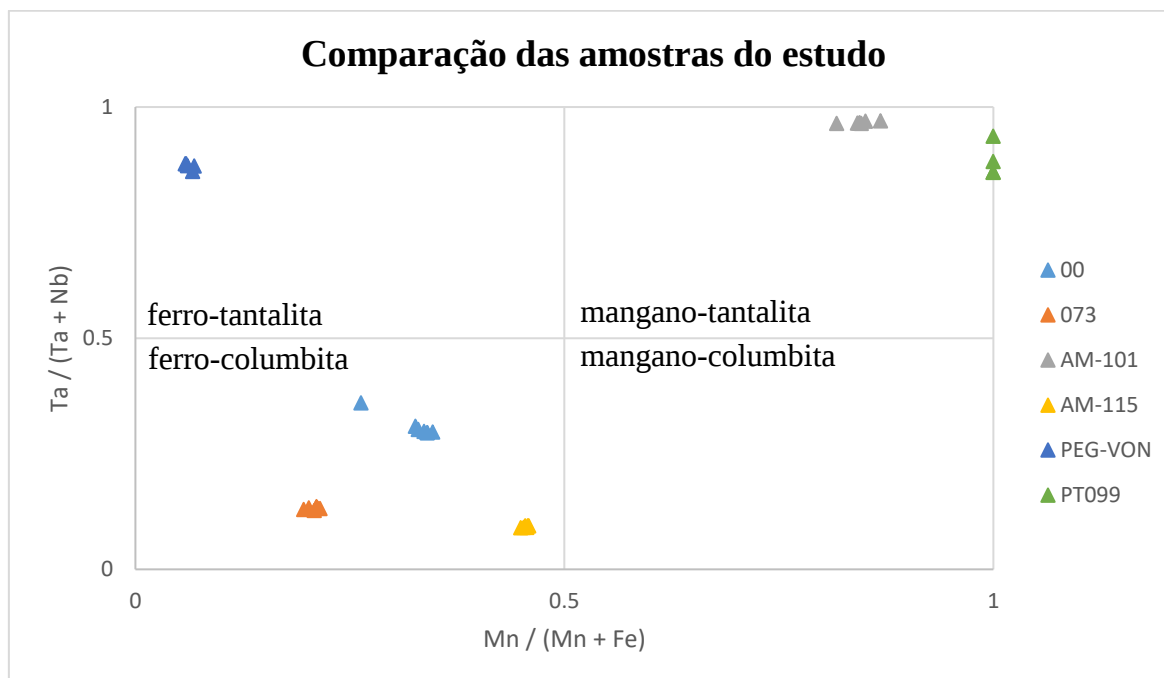


Figura 7.1 - Diagrama de comparação composicional entre as amostras 0, 073, AM-101, AM-115, PEG-VON e PT099 da série coltan.

De forma geral, as principais características que podem influenciar negativamente a utilização dos minerais da série coltan em pesquisas geocronológicas são a presença de inclusões, zonamentos, estruturas metamíticas e amostras discordantes (Vecci, 2015). Sabendo disso, buscou-se as amostras que não apresentem tais características, e, conseqüentemente são as que apresentam o maior potencial para uma datação de qualidade.

Levando essas informações em conta, as amostras da série coltan foram listadas, das melhores para as piores, no quesito potencial para datação:

- I. Por se mostrar homogênea, com poucas cavidades, fraturas e inclusões, a amostra deste estudo que é a mais indicada para a geocronologia é a AM-115.
- II. As segundas mais indicadas são as amostras 00, 073 e PEG-VON, que apresentam um número considerável de fraturas, poucas cavidades e inclusões.
- III. Por apresentar uma grande quantidade de espessas fraturas, além de algumas cavidades, a amostra AM-101 é a menos indicada para geocronologia.

De uma maneira geral, as amostras apresentam poucas ou nenhuma inclusão e zonamentos.

A amostra PT099 é tratada separadamente pelo fato de ser a única a apresentar urânio em sua composição. Essa característica pode ser fundamental na escolha de uma amostra para utilizar em geocronologia. Quanto aos seus outros parâmetros, por apresentar algumas cavidades grandes e várias pequenas, essa amostra não seria ideal para datação.

As amostras PT099 e AM-101 são consideradas as mais diferenciadas (Ginsburg *et al.* 1979) e classificam-se como classe miarolítica, a partir de suas composições e quantidades de Fe, Mn, Nb e Ta. Essa classificação coincide com sua baixa indicação para datação, não levando em conta a presença de U na amostra PT099.

Este trabalho traz resultados de química e mineralogia afim de auxiliar na padronização da utilização de minerais da série coltan em geocronologia, método alternativo em relação aos minerais mais tradicionais utilizados na datação. Estes resultados podem servir como fonte de dados para trabalhos futuros e de nível de detalhe maior e mais específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F. F. M. 1977. O Cráton São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **8**:349-364.
- Beurlen H., *et al.* 2011. Petrogenetic significance of LA-ICP-MS trace-element data on quartz from the Borborema Pegmatite Province, northeast Brazil. *Mineralogical Magazine*, **75**:2703-2719.
- Bizzi L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M. 2003. Gonçalves J. H. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. CPRM, Brasília.
- Breaks F. W., Selway J. B., Tindle A. G. 2006. Fertile and peraluminous granites and related rare-element mineralization in pegmatites, north-central and northeastern Superior Province. *Ontario Geological Survey Open File Report 6195*, Ontario, 143 p.
- Cameron E.N., Jahns R.H., McNair A., Page E.R. 1949. Internal Structure of Granitic Pegmatites. *Economic Geology, monograph 2*, 115p.
- Černý P. 1991a. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies? *Rev. Precamb. Research*, **51**:429-468.
- Černý P. 1991b. Rare-element granitic pegmatites. Černý P., Ercit T. S. 2005. The Classification of Granite Pegmatites Revisited. *The Canadian Mineralogist*, **43**:2005-2026.
- Che X., *et al.* 2015. In situ U–Pb isotopic dating of columbite–tantalite by LA–ICP–MS. *Ore Geology Reviews*, **65**:979-989.
- Dedavid B. A. 2007. *Microscopia Eletrônica de Varredura: aplicações e preparação de amostras*. Porto Alegre, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 60 p.
- Deng X., *et al.* 2013. U–Pb isotope and trace element analysis of columbite-(Mn) and zircon by laser ablation ICP–MS: Implications for geochronology of pegmatite and associated ore deposits. *Chemical Geology*, **344**:1-11.
- Dewaele S., Henjes-Kunst F., Melcher F., Sitnikova M., Burgess R., Gerdes A., Fernandez M.A., De Clercq F., Muchez P., Lehmann B. 2011. Late Neoproterozoic overprinting of the cassiterite and columbite-tantalite bearing pegmatites of the Gatumba area, Rwanda (Central Africa). *Journal of African Earth Sciences*, **61**: 10-26.
- Dias C. A. T., Junior W. B. L., Muzzolon T. 2013. Geologia e mineralogia do pegmatito estanífero cascavel, mina Bom Futuro, Rondônia. *Revista Geociências UNESP*, **32**:731-745.
- Duarte L. C. 2003. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. *Pesquisas em Geociências*, **30**:3-15.
- Fersman A. E. 1951. Les pegmatites, leur importance scientifique et pratique. In: Acad. Sci. URSS, 1931. Traduzido para o francês por R. du Trien de Terdonck e J. Thoureau. Universidade de Louvain, Bélgica, 3, 675p. Resumo em inglês.
- Fernando S. Para que serve o Nióbio? Conheça suas aplicações. 2018. Disponível em <<https://societificacom.br/2018/11/11/para-que-serve-o-niobio-conheca-suas-aplicacoes/>>. Acesso em 02 de agosto de 2019.
- Gandini A. L. 1999. *Aspectos da mineralogia, geoquímica, gêneses e potencialidade econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 261 p.
- Gäbler *et al.* 2011. Speeding Up the Analytical Workflow for Coltan Fingerprinting by an Integrated Mineral Liberation Analysis/LA-ICP-MS Approach. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **35**:431-448.
- 2015; Che *et al.* (2015). Che *et al.* (2015)
- Ginsburg A.I., Timofeyev, I.N., Feldman, L.G. 1979. *Principle of geology of the granitic pegmatites*. Nedra Moscow, 296 p.
- Holzle L. R. B. Tântalo – Aplicações do elemento no dia a dia. 30 de outubro de 2018. Disponível em <<https://www.tabelaperiodica.org/tantalo-aplicacoes-do-elemento-no-dia-a-dia/>>. Acesso em 02 de agosto de 2019.

Almeida, J. H. G. 2021, Caracterização Mineralógica e Química de Columbita-Tantalita de Pegmatitos...

Iwata S. A. 1995. *Pegmatitos graníticos da região de Socorro – SP*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 122 p.

Kemp J. F. 1924. The pegmatites. *Economic geology*, **19**:697-723.

Khashaba S. A. 2017. *Mineralogy of Niobium and Tantalum*. Trabalho de conclusão de curso. Kafrelsheikh University.

Landes K. K. 1933. Origin and classification of pegmatites. *Rev. American Mineralogist*, **18**: 33-56, 95-103.

Legros H. 2019. U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite minerals: Development of reference materials and in situ applications by ion microprobe. *Chemical Geology*, França, **512**:69-84.

Lira B. B. 2016. Estudo dos pegmatitos da província Borborema – Paraíba: Minerais e minérios de interesse tecnológico. *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*, **13**:113-119.

London D. 2008. Pegmatites. *The Canadian Mineralogist. Special publications 10. Mineralogical Association of Canada*, 347 p.

Maliska A. M. *Microscopia Eletrônica de Varredura*. Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, 97 p.

Melcher F., *et al.* 2015. Tantalum–(niobium–tin) mineralisation in African pegmatites and rare metal granites: Constraints from Ta–Nb oxide mineralogy, geochemistry and U–Pb geochronology. *Ore Geology Reviews*, **64**:667-719.

Melleton J. 2012. How are the emplacement of rare-element pegmatites, regional metamorphism and magmatism interrelated in the moldanubian domain of the variscan bohemian massif, czech republic? *The Canadian Mineralogist*, **50**:1751-1773.

Moura J. C. 2013. *Assinatura Geoquímica de columbita-tantalita e levantamento radiométrico de pegmatitos radioativos da região de Parelhas, Rio Grande do Norte, Brasil*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Neves B. 1975. *Regionalização Geotectônica do Pré-Cambriano Nordestino*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 198p.

Oliveira F. A. N. 2001. *Estudo do processo de piroexpansão de feldspatos pegmatíticos e caracterização tecnológica do feldspato potássico*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.

Oliveira R. G. 2008. *Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozoico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)*. Tese de doutorado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Phelps P.R., Lee C. T.A., Morton D.M. 2020. Episodes of fast crystal growth in pegmatites. *Nat Commun*, **11**:4986.

Raslan M. F., Ali M. A. 2014. Mineralogy and mineral chemistry of rare-metal pegmatites at Abu Rusheid granitic gneisses, South Eastern Desert, Egypt. *Geologija*. Egito, p. 205-222.

Romer R. L., Smeds S. 1996. U-Pb columbite chronology of post-kinematic Palaeoproterozoic pegmatites in Sweden. *Precambrian Research*, **82**:85-99.

Romer R. L., Wright J. E. 1992. U-Pb dating of columbites: A geochronologic tool to date magmatism and ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **5**:2137-2142.

Saad A. Z., Trzaskos B., Vasconcellos E. M. G. 2019. Caracterização mineral e tecnológica de resíduo do beneficiamento de arenitos da formação furnas: estudo de caso Areal Costa, Campo Largo – PR. *Revista Geociências UNESP*, **38**:73-87.

Sá E. F. J. 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia brasileira /pan-africana*. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Silva M. R. R., Holl R., Beurlen H. 1995. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences*, **8**:355-364.

Silva S. M. P., Crósta A. P. 2011. Mapeamento de pegmatitos da Faixa Seridó (FSe) com base na análise por componentes principais de imagens TM/Landsat-5 e Terra/ASTER e o apoio da espectroscopia de reflectância. *XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Curitiba, p. 3597-3604.

Soares D. R. 2018. Variedades gemológicas de minerais da Província Pegmatítica da Borborema, NE do Brasil: uma síntese. *Estudos geológicos*, **28**:56-71.

Vecci A. N. 2015. *Caracterização mineralógica e química de columbita-tantalita de pegmatitos de Minas Gerais*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 58 p.

Vieira E. V., Vidal F. W. H. 2016. Projeto de estudos sobre minerais da região da província mineral da Borborema nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. *IX Simpósio de rochas ornamentais do Nordeste e IV simpósio de minerais industriais do Nordeste*, Universidade Federal de Campina Grande.