

Caracterização de Nb-tantalatos em pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Minas Gerais).

Characterization of Nb-tantalates in pegmatites from the Brazilian Eastern Pegmatite Province (Minas Gerais).

Caracterización de Nb-tantalatos en pegmatitas de la Provincia Pegmatítica Oriental de Brasil (Minas Gerais)

Coralie Heinis Dias¹, Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves², Paulo Roberto Gomes Brandão[†], Filipe Gomes Fagundes³, Flávia Cristina Silveira Braga³, Christian Emiliano de Araujo Aquino Braga¹

¹Universidade do Estado de Minas Gerais, João Monlevade, Minas Gerais, Brasil.

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

[†]*in memoriam*

RESUMO

Introdução: Nióbio e tântalo são metais com diversas aplicações e que vêm ganhando forte posição de destaque como metais estratégicos. O conhecimento de minerais contendo tais elementos é fundamental no apoio ao desenvolvimento da produção destes materiais.

Objetivo: O presente trabalho teve como objetivo a caracterização mineralógica detalhada de amostras de Nb-tantalatos provenientes dos três principais distritos pegmatíticos onde eles ocorrem: Araçuaí, São José da Safira e Conselheiro Pena, destacando-se os distritos de Araçuaí e São José da Safira, que possuem maior grau de fracionamento e são portadores de espodumênio, tantalita e columbita, além de turmalinas coloridas.

Métodos: A metodologia do estudo consistiu de trabalhos de campo para coleta de amostras seguidos de ensaios laboratoriais. Devido à dificuldade de se encontrar grãos de Nb-tantalatos in loco nos pegmatitos, várias das amostras estudadas foram obtidas através de colecionadores ou comerciantes de minerais. Trabalhos laboratoriais posteriores envolveram a separação de grãos de Nb-tantalatos para análises pelos métodos de fluorescência e difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura para obtenção de imagens do tipo BSE e análise química pelo detector EDS. As localidades amostradas no Distrito Pegmatítico de Araçuaí foram a Mina da Água Santa, em Coronel Murta, a Lavra do Urubu, em Itinga e a Mina da Cachoeira, em Araçuaí, além de amostras de origem eluvionar coletadas em Araçuaí. No Distrito Pegmatítico de São José da Safira, foram obtidas amostras da Mina do Cruzeiro, em São José da Safira, e da Lavra da Generosa, em Sabinópolis. No Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena, a localidade amostrada foi a Lavra Itatiaia, em Conselheiro Pena.

Resultados: Nas análises realizadas, as principais fases contendo Ta e Nb identificadas por difração de raios-X foram columbita-tantalita nas minas do Cruzeiro e da Água Santa, nas lavras do Ipê e da Generosa, e na amostra de origem eluvionar; tapiolita-Fe na Mina da Cachoeira e na Lavra do Urubu; e wodginita na Mina da Cachoeira e na Lavra Itatiaia. Em grãos da Mina da Cachoeira e na amostra de origem eluvionar foram identificadas inclusões de zircão. Na Mina da Cachoeira, estudo prévio havia reconhecido também a ixiolita.

Conclusão: Os resultados desta pesquisa permitiram ampliar o conhecimento sobre as fases minerais contendo nióbio e tântalo em depósitos de Minas Gerais, contribuindo ainda com o desenvolvimento

Correspondência:

Coralie Heinis Dias
Universidade do Estado
de Minas Gerais, João
Monlevade, Minas Gerais,
Brasil.
Email:
coralie.dias@uemg.br

de suas futuras aplicações.

Palavras-chave: Nióbio; Tântalo; Mineralogia; Columbita; Tantalita.

ABSTRACT

Introduction: Niobium and tantalum are metals with diverse applications and have increasingly been recognized as strategic metals. Understanding the minerals that contain these elements is essential to supporting the development of their production.

Objective: This study aimed to provide a detailed mineralogical characterization of Nb-tantalate samples from the three main pegmatitic districts where they occur: Araçuaí, São José da Safira, and Conselheiro Pena. Special emphasis was placed on the Araçuaí and São José da Safira districts, which exhibit a higher degree of fractionation and contain spodumene, tantalite, columbite, and colored tourmalines.

Methods: The study methodology included a literature review followed by fieldwork for sample collection. Due to the challenge of finding Nb-tantalate grains in situ within pegmatites, many of the analyzed samples were obtained from mineral collectors or traders. Laboratory work involved separating Nb-tantalate grains for analysis using X-ray fluorescence and diffraction, scanning electron microscopy for backscattered electron imaging, qualitative chemical analysis via an EDS detector, and electron microprobe analysis. In the Araçuaí Pegmatite District, samples were collected from the Água Santa Mine in Coronel Murta, Lavra do Urubu in Itinga, and Cachoeira Mine in Araçuaí, as well as from eluvial deposits in Araçuaí. In the São José da Safira Pegmatite District, samples were obtained from the Cruzeiro Mine in São José da Safira and the Generosa Mine in Sabinópolis. In the Conselheiro Pena Pegmatite District, sampling was conducted at the Itatiaia Mine in Conselheiro Pena.

Results: X-ray diffraction analyses identified the main Ta- and Nb-bearing phases as tantalite-columbite at the Cruzeiro and Água Santa mines, the Ipê and Generosa mines, and in the eluvial samples; tapiolite-Fe at the Cachoeira Mine and Lavra do Urubu; and wodginita at the Cachoeira and Itatiaia mines. Zircon inclusions were observed in grains from the Cachoeira Mine and eluvial samples. Previous studies at the Cachoeira Mine had also identified ixolite.

Conclusion: This research expands the understanding of niobium- and tantalum-bearing mineral phases in deposits across Minas Gerais, contributing to the development of their future applications.

Keywords: Niobium; Tantalum; Mineralogy; Columbite; Tantalite.

RESUMEN

Introducción: El niobio y el tantalio son metales con diversas aplicaciones que han ido adquiriendo una fuerte posición destacada como metales estratégicos. El conocimiento de minerales que contienen estos elementos es fundamental para apoyar el desarrollo de la producción de estos materiales.

Objetivo: Este trabajo tuvo como objetivo la caracterización mineralógica detallada de muestras de Nb-tantalatos provenientes de los tres principales distritos pegmatíticos donde ocurren: Araçuaí, São José da Safira y Conselheiro Pena, destacándose los distritos de Araçuaí y São José da Safira, que tienen un mayor grado de fraccionamiento y contienen espodumena, tantalita y columbita, además de turmalinas coloreadas.

Métodos: La metodología del estudio consistió en una revisión bibliográfica seguida de trabajos de campo para la recolección de muestras. Debido a la dificultad de encontrar granos de Nb-tantalatos in situ en las pegmatitas, varias de las muestras estudiadas fueron obtenidas a través de coleccionistas o comerciantes de minerales. Los trabajos de laboratorio posteriores implicaron la separación de los granos de Nb-tantalatos para análisis mediante métodos de fluorescencia y difracción de rayos X, microscopía electrónica de barrido para obtener imágenes de electrones retrodispersados y análisis químico cualitativo mediante el detector EDS y microsonda electrónica. Las localidades muestreadas en el Distrito Pegmatítico de Araçuaí fueron la Mina da Água Santa, en Coronel Murta, la Lavra do Urubu, em Itinga, y la Mina da Cachoeira, en Araçuaí, además de muestras de origen eluvial recolectadas en Araçuaí. En el Distrito Pegmatítico de São José da Safira, se obtuvieron muestras de la Mina do Cruzeiro, en São José da Safira, y de la Lavra da Generosa, en Sabinópolis. En el Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena, la localidad muestreada fue la Lavra Itatiaia, en Conselheiro Pena.

Resultados: En los análisis realizados, las principales fases que contienen Ta y Nb identificadas por difracción de rayos X fueron columbita-tantalita en las minas del Cruzeiro y Água Santa, en las explotaciones del Ipê y Generosa, y en la muestra de origen eluvial; tapiolita-Fe en la Mina da Cachoeira y la Lavra do Urubu; y wodginita en la Mina da Cachoeira y la Lavra Itatiaia. Se identificaron inclusiones de circonio en granos de la Mina da Cachoeira y en la muestra de origen eluvial. En la Mina da Cachoeira, un estudio previo también había reconocido la ixolita.

Conclusión: Los resultados de esta investigación permitieron ampliar el conocimiento sobre las fases minerales que contienen niobio y tantalio en los depósitos de Minas Gerais, contribuyendo aún más al desarrollo de sus futuras aplicaciones.

Palabras-clave: Niobio; Tantalio; Mineralogía; Columbita; Tantalita.

INTRODUÇÃO

Nióbio e tântalo estão entre os metais designados como “materiais críticos” ou “recursos estratégicos” pela Comissão Europeia (Blengini *et al.*, 2020; Grohol e Veeh, 2023) e pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey, 2020), assim como pelos governos da Austrália, do Canadá e do Japão (Australian Government, 2020; Government of Canada, 2021; Nakano, 2021). Minerais críticos são considerados essenciais para a economia de países industrializados, e possuem diversas aplicações tecnológicas em vários setores de crescente relevância econômica e estratégica (Australian Government, 2020). De acordo com von Rennenberg (2021), além da elevada importância econômica destes materiais, existe também um alto risco com relação à sua oferta no mercado mundial. Graedel *et al.* (2022) destacam, entretanto, que cada governo tem gerado suas próprias listas de materiais críticos, com algumas diferenças entre elas, sendo aplicáveis apenas em um prazo relativamente curto.

No Brasil, o Decreto nº 10.657 de 24 de março de 2021 instituiu a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos, abrangendo: “I - bem mineral do qual o País dependa de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia; II - bem mineral que tenha importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia; ou III - bem mineral que detenha vantagens comparativas e que seja essencial para a economia pela geração de superavit da balança comercial do País” (Brasil, 2021). De acordo com o Plano Nacional de Mineração, o Brasil destaca-se internacionalmente tanto na produção quanto no volume de reservas de tântalo e nióbio (Brasil, 2022).

O Brasil é responsável por 92% da produção mundial de nióbio (Grohol e Veeh, 2023). A maior parte desta produção é destinada ao mercado internacional (Silveira e Resende, 2020), e é predominantemente oriunda de um único depósito do tipo carbonatito em Araxá (Williams-Jones e Vasyukova, 2023); 75% das reversas brasileiras de nióbio localizam-se nesta única mina, operada pela CBMM (Dolganova *et al.*, 2020). Segundo Zeng *et al.* (2024), cerca de 90% da produção mundial de nióbio é empregada na fabricação de ferro nióbio (FeNb), uma liga metálica amplamente utilizada na indústria do aço. A produção mundial de tântalo, por outro lado, provém majoritariamente da República Democrática do Congo (35%), seguida por Ruanda (17%), Brasil (16%) e Nigéria (11%), de acordo com Grohol e Veeh (2023).

Estes metais são encontrados principalmente em pegmatitos graníticos contendo elementos raros, na composição dos minerais da série columbita-tantalita. Esta série é formada pelos quatro membros finais: columbita-(Fe), columbita-(Mn), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn). Segundo Melcher *et al.* (2017), estes minerais são responsáveis pela maior parte da produção de tântalo. Os minerais portadores de Ta e Nb são exclusivamente da classe dos óxidos (Rajak *et al.*, 2022), e costumam ocorrer associados a minerais contendo outros metais raros como Sn e Li (Duuring, 2020). Ixiolita e wodginita são outros óxidos contendo nióbio e tântalo que ocorrem em pegmatitos, porém em menores proporções. As principais características destes minerais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características mineralógicas dos principais óxidos de tântalo e nióbio. Fonte: Handbook of Mineralogy (<http://www.handbookofmineralogy.org/>)

Espécie / Fórmula química	Sistema cristalográfico	Dureza	Peso específico medido	Cor
Columbita-(Fe) (Fe ²⁺ , Mn ²⁺)(Nb, Ta) ₂ O ₆	Ortorrômico	6	5,20-6,65	Preta
Columbita-(Mn) (Mn ²⁺ , Fe ²⁺)(Nb, Ta) ₂ O ₆	Ortorrômico	6	5,20-6,65	Preta
Tantalita-(Fe) Fe ²⁺ Ta ₂ O ₆	Ortorrômico	6-6,5	6,65-7,95	Preta
Tantalita-(Mn) Mn ²⁺ Ta ₂ O ₆	Ortorrômico	6	6,65-8,00	Rosa, marrom avermelhado a preta
Ixiolita (Ta, Nb, Sn, Fe, Mn)O ₂	Monoclínico	6-6,5	6,94-7,23	Preta

Wodginita $\text{Mn}^{2+}(\text{Sn}^{4+}, \text{Ta})\text{Ta}_2\text{O}_8$	Monoclínico	5,5	7,19-7,36	Marrom avermelhado a preta
---	-------------	-----	-----------	-------------------------------

De acordo com Ercit *et al.* (1995), os minerais do grupo da columbita possuem fórmula geral AB_2O_6 , em que A representa, na maioria das vezes, Fe^{2+} , Mn, e Mg, e B representa Nb e Ta. Amostras nas quais Nb é o cátion dominante na posição B são designadas de columbitas, enquanto aquelas em que predomina o Ta recebem o nome de tantalitas. O cátion dominante na posição A é mencionado após o nome, por exemplo columbita-(Fe), ou tantalita-(Mn). Já a fórmula ideal da wodginita é dada por $\text{MnSnTa}_2\text{O}_8$ (Ercit *et al.*, 1992).

Pegmatitos são rochas essencialmente ígneas, de composição na maioria das vezes granítica, que distinguem de outras rochas ígneas pela granulometria extremamente grossa, porém variável, de seus minerais formadores, ou pela abundância de cristais com hábito esquelético (textura gráfica), ou outros hábitos de crescimento fortemente direcionais, conforme definição de London (2008). Os pegmatitos podem ser classificados como homogêneos ou heterogêneos, de acordo com a distribuição dos minerais e existência ou não de zonamento no interior do corpo. Segundo Vidal e Neto (2005), os pegmatitos heterogêneos são, em sua maioria, mineralizados em tantalita-columbita e berilo. Óxidos de Nb e Ta são ferramentas potenciais para contribuir para o entendimento geológico de uma mineralização de Nb-Ta em pegmatito, no entanto, não permitem uma classificação completa de todo o pegmatito, a qual é mais complexa pois envolve a outros elementos raros (Dill, 2015).

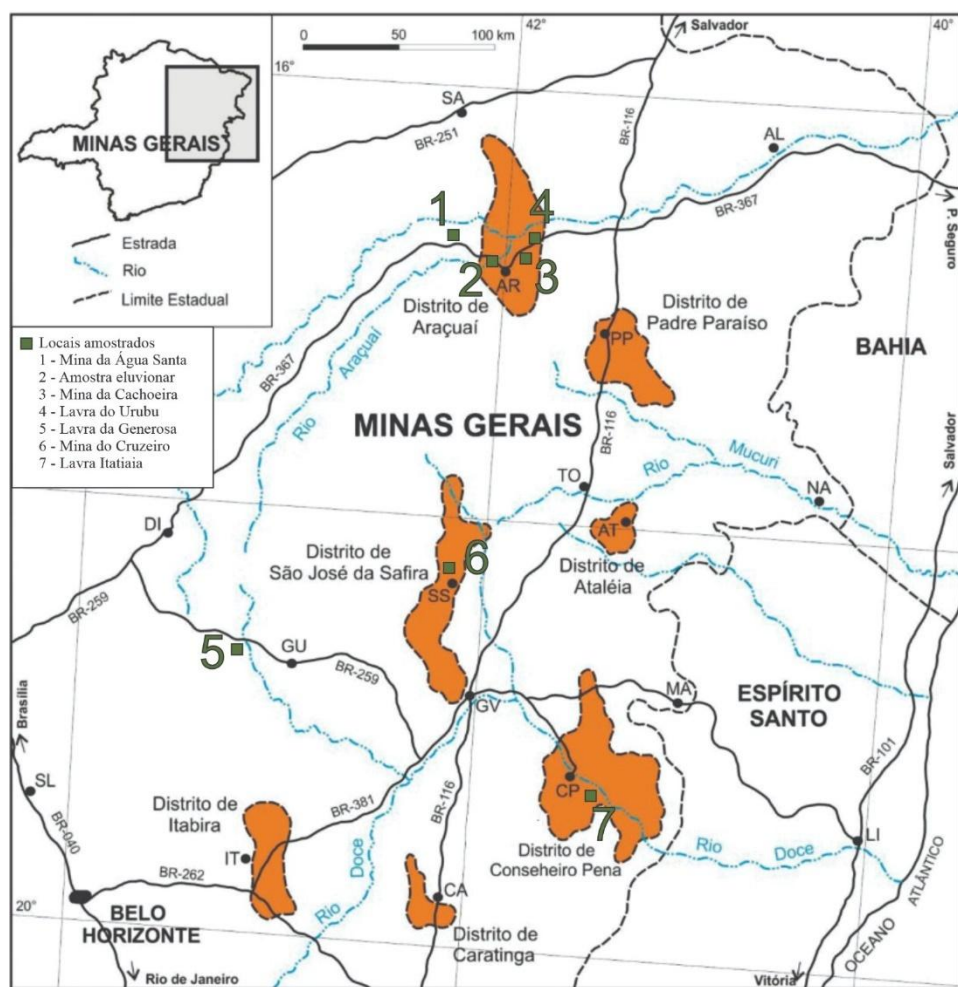
Os pegmatitos podem ainda ser classificados segundo o tipo químico em LCT (lítio-césio-tântalo) ou NYF (nióbio-ítrio-flúor), correspondendo aos elementos acumulados pelo fracionamento magmático ocorrido durante a formação e migração dos fluidos pegmatíticos (Černý, 1991; Bradley *et al.*, 2017). Segundo Kendall-Langley *et al.* (2020), os pegmatitos LCT representam a última atividade do magmatismo granítico em seus terrenos hospedeiros. A composição dos minerais da série columbita-tantalita varia de acordo com o fracionamento e cristalização do pegmatito (Barbosa, 2021). No Brasil, e especificamente em Minas Gerais, óxidos de tântalo, nióbio além de outros metais raros ocorrem em pegmatitos graníticos ricos em lítio (tipo-LCT), na área da chamada Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB), no âmbito do Orógeno Araçuai. Os pegmatitos presentes na PPOB foram agrupados em diferentes distritos pegmatíticos por Netto *et al.* (1998), e posteriormente por Pedrosa-Soares *et al.* (2011, 2022), em função da distribuição geográfica dos tipos de pegmatitos, bem como suas relações com as rochas encaixantes e os granitos parentais, suas idades e principais recursos minerais.

Trabalhos anteriores, como o de Dias e Chaves (2015) e Dias (2015), analisaram amostras de Nb-tantalatos de um pegmatito da PPOB como parte do projeto de mestrado da primeira autora. O presente trabalho representa uma continuação destes estudos, e teve como objetivo a caracterização mineralógica detalhada de amostras de nióbio-tantalatos provenientes dos três principais distritos pegmatíticos onde eles ocorrem: Araçuai, São José da Safira e Conselheiro Pena.

MÉTODOS

Para estudo detalhado da composição química dos nióbio-tantalatos abordados neste projeto, a metodologia adotada consistiu inicialmente na realização de trabalhos de campo nas principais localidades em que são conhecidas ocorrências de minerais de tântalo e nióbio em pegmatitos de Minas Gerais. Nestes locais, além de descrições geológicas e mineralógicas, foi realizada coleta de amostras para realização de análises laboratoriais. Devido à dificuldade de se encontrar grãos de Nb-tantalatos *in loco* nos pegmatitos, as amostras estudadas foram selecionadas após separação do material lavrado, ou obtidas através de colecionadores ou comerciantes de minerais.

A Figura 1 mostra a distribuição dos locais de amostragem, onde os pontos 1 a 4 se referem às amostras obtidas no Distrito Pegmatítico de Araçuai, os pontos 5 e 6 no Distrito Pegmatítico de São José da Safira, e o ponto 7 no Distrito Pegmatítico de Conselheiro Pena. A Figura 2 mostra os grãos selecionados para estudo no Distrito Pegmatítico de Araçuai. A amostra da Mina da Água Santa (Figura 2A) foi doada por um funcionário da empresa, com tamanho inicial de aproximadamente 3 x 4 cm, sendo posteriormente fragmentada com auxílio de martelo geológico para obter grãos entre 1 e 3



mm de largura. A Figura 3 mostra as demais amostras selecionadas e duas seções polidas confeccionadas com os grãos de Nb-tantalatos.

Figura 1: Mapa de localização dos pontos amostrados, com localização dos distritos pegmatíticos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (modificado de Silveira et al., 2014). Os locais amostrados estão indicados pelos quadrados de cor verde.

Cidades: SL, Sete Lagoas; IT, Itabira; CA, Caratinga; MA, Mantena; GV, Governador Valadares; DI, Diamantina; CP, Conselheiro Pena; AT, Ataléia; TO, Teófilo Otoni; SS, São José da Safira; GU, Guanhães; NA, Nanuque; AR, Araçuaí; PP, Padre Paraíso; SA, Salinas; AL, Almenara.



Figura 2: Amostras de Nb-tantalatos do Distrito Pegmatítico de Araçuaí selecionadas para estudo. A. Mina da Água Santa. B. Amostra de origem eluvionar. C. Mina da Cachoeira. D. Lavra do Urubu.

Uma vez coletadas e separadas as amostras, os fragmentos dos minerais (Figuras 2 e 3), de tamanho entre 1 e 5 mm, foram embutidos em seções polidas (Figura 3D) para análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Parte dos grãos selecionados foi enviada para realização de análises de difração de raios X para identificação preliminar de fases minerais presentes e de fluorescência de raios X para conhecimento da composição química geral das amostras.

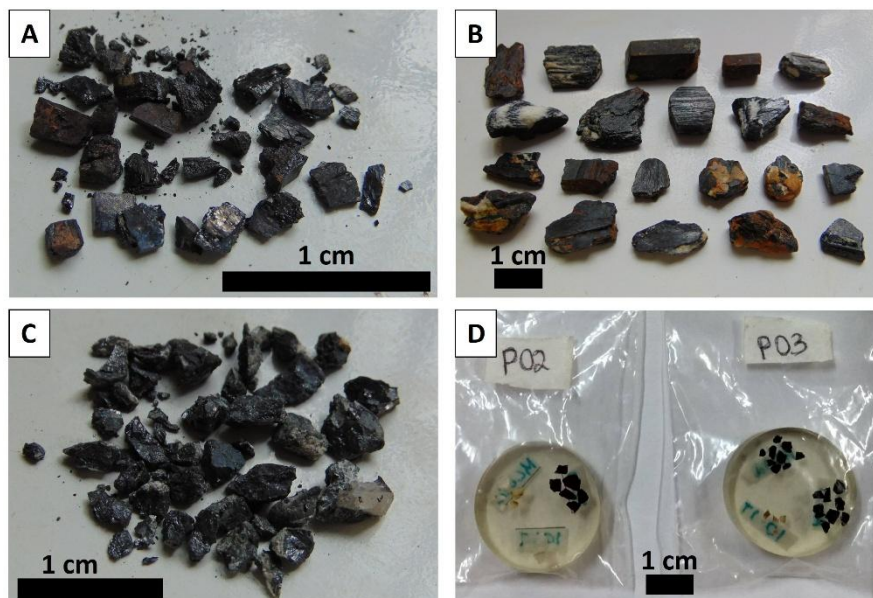


Figura 3: Amostras de Nb-tantalatos selecionadas para estudo. A. Lavra da Generosa. B. Mina do Cruzeiro. C. Lavra Itatiaia. D. Seções polidas confeccionadas com os grãos da Mina da Água Santa e da Mina do Cruzeiro.

As análises de fluorescência de raios X foram realizadas pela empresa FRX Service Ltda, utilizando espectrômetro de fluorescência de raios X WDS, Panalytical, Modelo Magix, tubo com ânodo de Rh. As amostras e os padrões foram preparados por fusão alcalina. As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Minérios e Materiais do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, utilizando difratômetro 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, tubo de anodo de cobre. Foi realizada identificação de fases (minerais) e semiquantificação pelo método baseado na abordagem de Rietveld.

As análises de MEV-EDS foram conduzidas no Laboratório de Microscopia do Centro Tecnológico da UEMG João Monlevade, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca TESCAN, modelo VEGA 3-, pela técnica de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e no modo Elétrons Retroespalhados (BSE), X-MaxN da marca Oxford Instruments, com a tensão de 20 kV e BI de 14. A partir dos resultados das análises de MEV-EDS, foram plotados os diagramas composicionais binário Ta/(Ta+Nb) x Mn/(Mn+Fe) e ternário Ta₂O₅, Nb₂O₅ e SnO₂. De acordo com Vecci *et al.* (2022), as análises de MEV-EDS são suficientes para caracterização geoquímica dos minerais do grupo da columbita-tantalita, por não conterem água ou elementos leves como Li e Be em sua estrutura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de fluorescência de raios X mostraram predominância dos elementos Nb e Ta na maioria das amostras, com exceção da amostra da Lavra do Urubu, que apontou grande quantidade de Sn devido à presença de cassiterita, e da amostra da Lavra da Generosa, com presença

de W contido na wolframita (Tabela 2).

Tabela 2: Resultados das análises de fluorescência de raios X. Localidade das amostras analisadas: ASA – Mina da Água Santa, Coronel Murta; ELU – origem eluvionar, Araçuaí; CAC – Mina da Cachoeira, Araçuaí; URU – Lavra do Urubu, Itinga; GEN – Lavra da Generosa, Sabinópolis; CRU – Mina do Cruzeiro, São José da Safira; ITA – Lavra Itatiaia, Conselheiro Pena.

	ASA	ELU	CAC	URU	GEN	CRU	ITA
Nb₂O₅	71,47	28,23	38,88	2,6	14,02	48,04	8,64
Ta₂O₅	6,72	55,04	41,23	5,66	25,8	23,9	63,45
Fe₂O₃	5,81	9,32	8,81	1,71	12,56	4,6	3,54
MnO	7,89	3,55	4,17	0,47	4,12	6,37	6,64
SiO₂	4,43	0,91	0,36	0,49	0,18	7,5	1,25
SnO₂	0,22	1,58	4,8	86,98	0,86	5,17	11,77
WO₃	0,98	<0,01	<0,01	<0,01	40,97	<0,01	<0,01
Al₂O₃	1,07	0,48	0,15	0,52	0,2	2,8	1,91
TiO₂	0,51	0,55	0,88	0,33	0,27	0,38	0,41
ZrO₂	0,42	<0,01	0,64	0,98	0,14	0,27	0,6
Na₂O	0,36	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,47	<0,1
CaO	0,08	0,12	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,1
K₂O	0,02	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	<0,01
P₂O₅	<0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
PPC 1000°C	0	0	0	0,22	0,79	0,35	1,58

As análises de difração de raios X revelaram diferentes fases minerais contendo Nb e Ta (Tabela 3).

Tabela 3: Resultados das análises de difração de raios X. Amostras analisadas: ASA – Mina da Água Santa, Coronel Murta; ELU – origem eluvionar, Araçuaí; CAC – Mina da Cachoeira, Araçuaí; URU – Lavra do Urubu, Itinga; GEN – Lavra da Generosa, Sabinópolis; CRU – Mina do Cruzeiro, São José da Safira; ITA – Lavra Itatiaia, Conselheiro Pena.

	Minerais (fases) presentes	% em massa
ASA	columbita-Fe	91,7
	tapiolita-Fe	8,3
ELU	columbita-Fe	86,1
	tapiolita-Fe	13,9
CAC	wodginita	94,6
	tapiolita-Fe	5,4
URU	cassiterita	90,0
	tapiolita-Fe	10,0
GEN	wolframita (ferberita/hubnerita)	79,5
	tantalita-columbita	20,5
	albita	36,0
CRU	wodginita	42,4
	manganotantalita	12,6
	quartzo	9,0
ITA	wodginita	72,0
	quartzo	28,0

Durante as análises de microscopia eletrônica de varredura foram obtidas imagens BSE, bem como espectros de EDS em vários pontos das amostras. Na amostra da Mina da Água Santa, o único Nb-tantalato identificado por EDS foi columbita-(Fe) – (Fe²⁺, Mn²⁺)(Nb,Ta)₂O₆ (Figuras 4A, 4B e 4C).

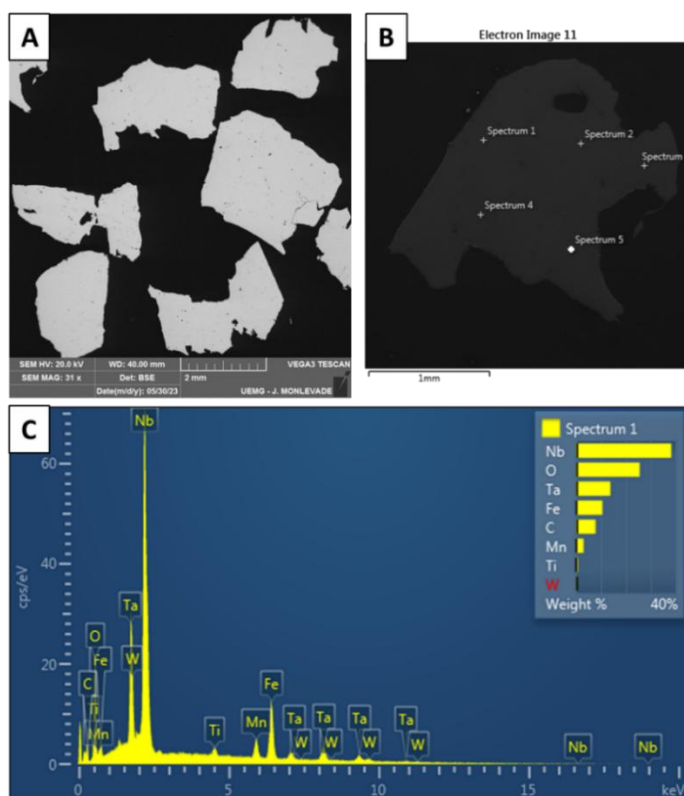


Figura 4: A. Imagem de elétrons retroespalhados da amostra da Mina da Água Santa, composta por oito grãos de Nb-tantalatos. B. Grão analisado de Nb-tantalato. C. Espectro de EDS de columbita-(Fe) do mesmo grão.

Na amostra de origem eluvionar, as prováveis fases identificadas por EDS foram tantalita-columbita – $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$, muscovita – $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$ e zircão – $(\text{Zr}, \text{Hf})\text{SiO}_4$ (Figuras 5A, 5B, 5C, 5D e 5E).

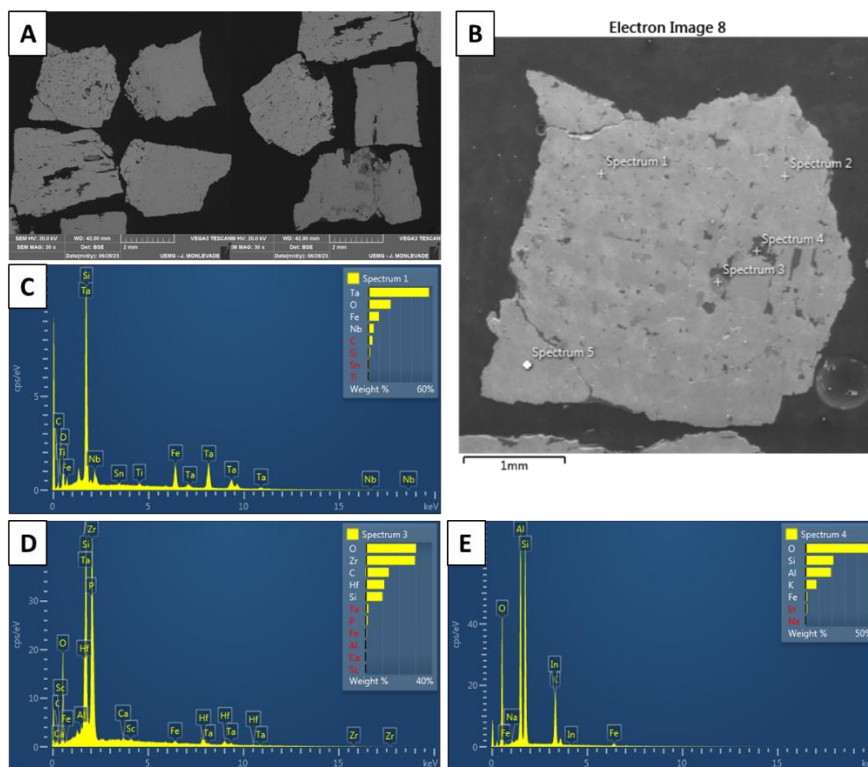


Figura 5: A. Imagens de elétrons retroespalhados da amostra de origem eluvionar, composta por sete grãos de Nb-tantalatos. B. Grão analisado de Nb-tantalato. C. Espectro de EDS de tantalita-columbita do mesmo grão. D. Espectro de EDS de muscovita do mesmo grão. E. Espectro de EDS de zircão do mesmo grão.

As prováveis fases identificadas por EDS na amostra da Mina da Cachoeira foram tapiolita-Fe –

(Fe²⁺, Mn²⁺)(Ta, Nb)₂O₆, wodginita – (Ta, Nb, Sn, Mn, Fe)₁₆O₃₂ e zircão – ZrSiO₄ (Figuras 6A, 6B, 6C, 6D e 6E).

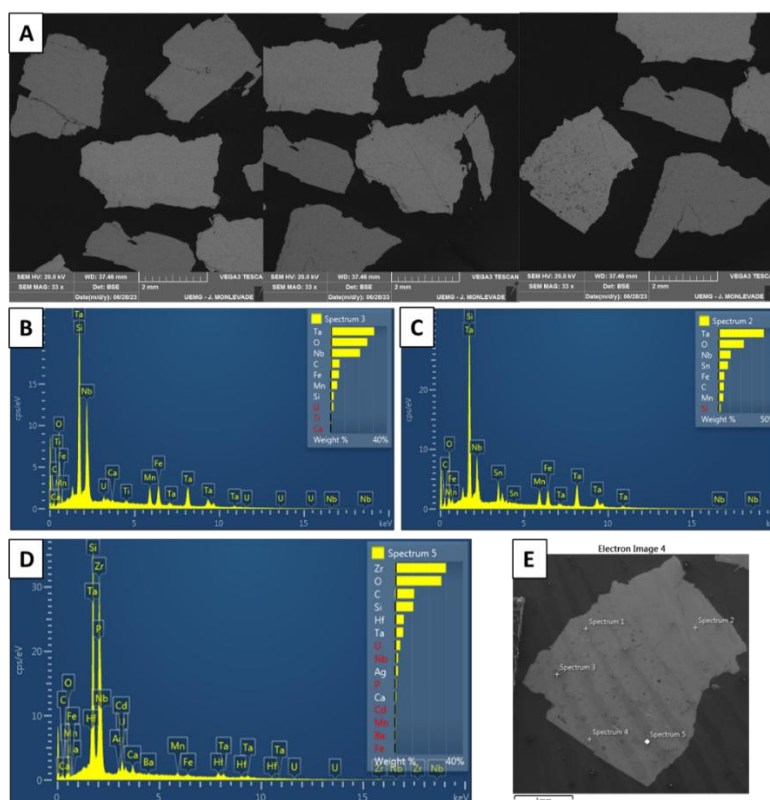


Figura 6: A. Imagens de elétrons retroespalhados da amostra da Mina da Cachoeira, composta por sete grãos de Nb-tantalatos. B. Espectro de EDS de tapiolita-Fe desta amostra. C. Espectro de EDS de wodginita desta amostra. D. Espectro de EDS de zircão desta amostra. E. Grão analisado de Nb-tantalato da Mina da Cachoeira.

A única fase identificada por EDS na amostra da Lavra do Urubu foi cassiterita – SnO₂ (Figuras 7A, 7B e 7C).

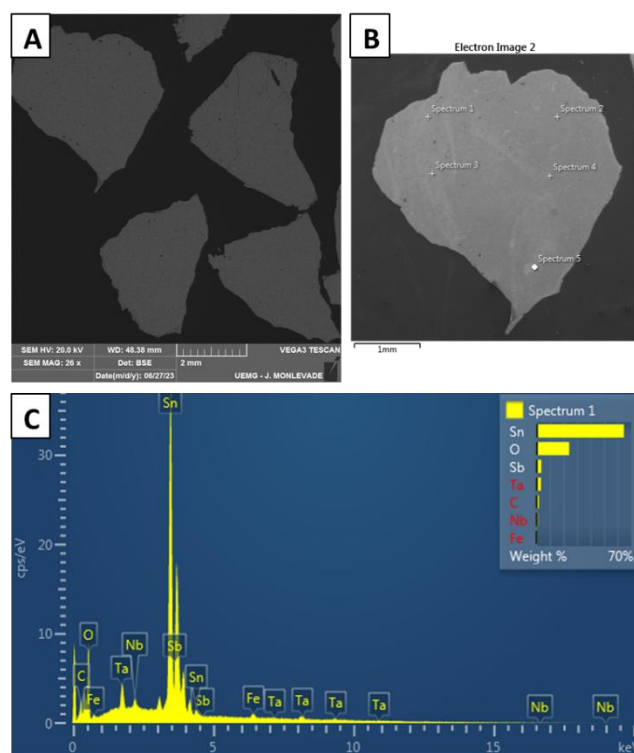


Figura 7: A. Imagem de elétrons retroespalhados da amostra da Lavra do Urubu, composta por oito grãos de cassiterita. B.

Grão analisado de cassiterita. C. Espectro de EDS da cassiterita deste grão.

O único Nb-tantalato identificado por EDS na amostra da Lavra da Generosa foi tantalita-(Fe) – $\text{Fe}^{2+}\text{Ta}_2\text{O}_6$, além da identificação do tungstato wolframita (ferberita/hubnerita) – $(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$ (Figuras 8A, 8B, 8C, 8D e 8E).

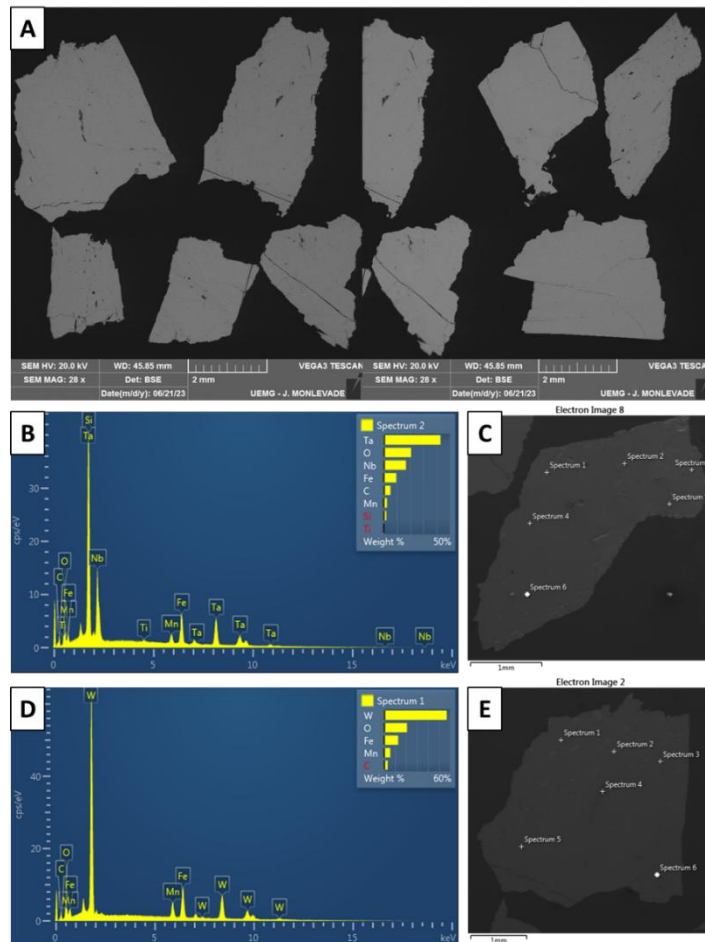


Figura 8: A. Imagens de elétrons retroespalhados da amostra da Lavra da Generosa, composta por oito grãos de Nb-tantalatos e wolframita. B. Espectro de EDS de tantalita-(Fe). C. Grão analisado de Nb-tantalato da Lavra da Generosa. D. Espectro de EDS de wolframita. E. Grão analisado de wolframita.

As prováveis fases identificadas por EDS na amostra da Mina do Cruzeiro foram columbita-(Fe) – $(\text{Fe}^{2+},\text{Mn}^{2+})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6$ e tantalita-(Mn) – $\text{Mn}^{2+}\text{Ta}_2\text{O}_6$ (Figuras 9A, 9B, 9C, 9D e 9E).

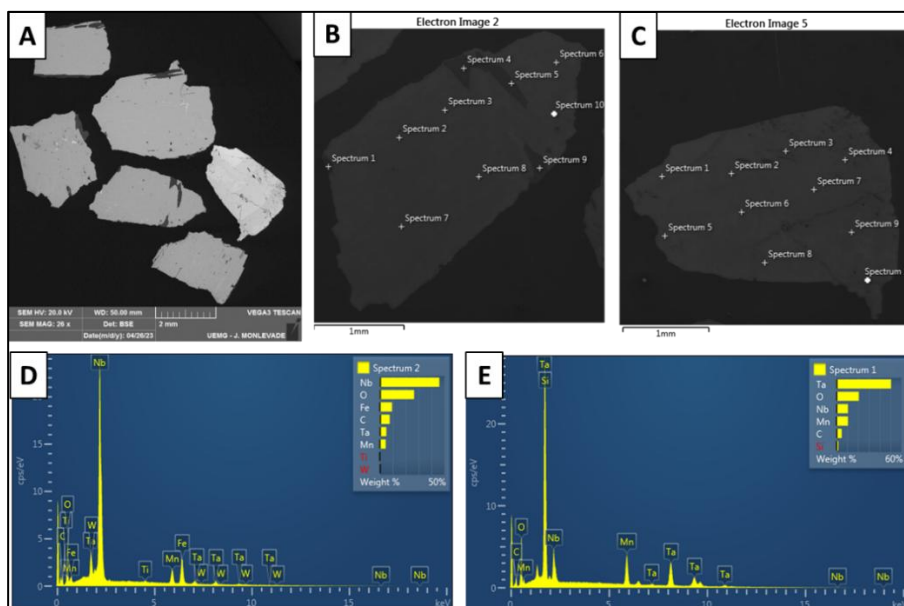


Figura 9: A. Imagem de elétrons retroespalhados da amostra da Mina do Cruzeiro, composta por seis grãos de Nb-tantalatos. B. e C. Grãos analisados de Nb-tantalatos. D. Espectro de EDS de columbita-(Fe) obtido em análise do grão mostrado em B. E. Espectro de EDS de tantalita-(Mn) obtido em análise do grão mostrado em C.

O único Nb-tantalato identificado por EDS na amostra da Lavra Itatiaia foi wodginita – $(\text{Ta}, \text{Nb}, \text{Sn}, \text{Mn}, \text{Fe})_{16}\text{O}_{32}$ (Figuras 10A, 10B e 10C).

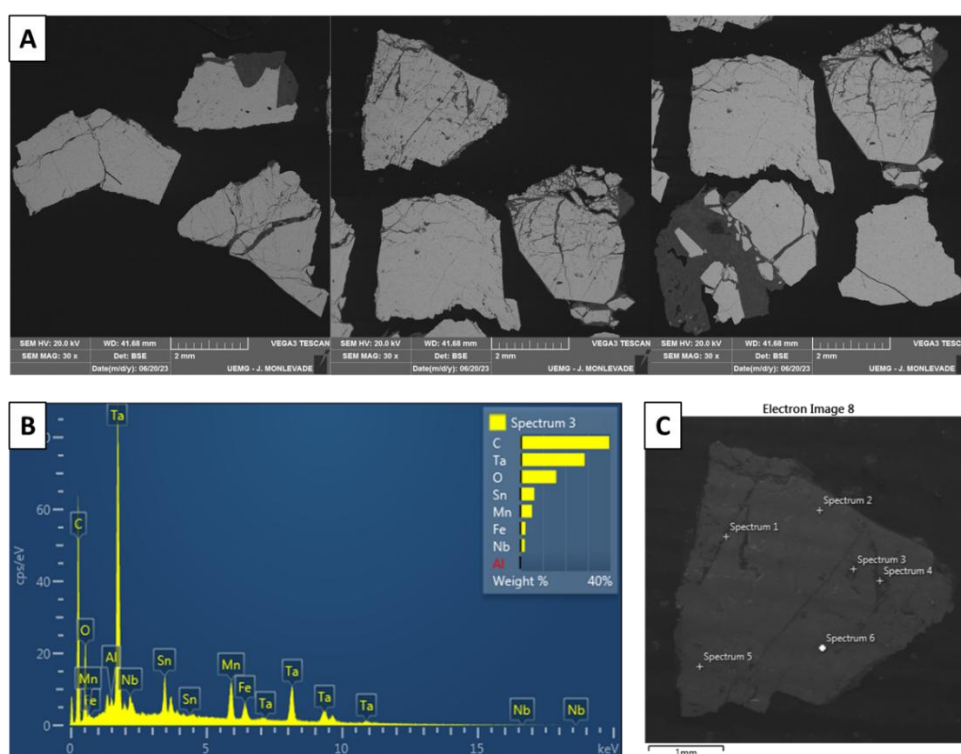


Figura 10: A. Imagens de elétrons retroespalhados da amostra da Lavra Itatiaia, composta por oito grãos de Nb-tantalatos. B. Espectro de EDS de wodginita desta amostra. C. Grão analisado de Nb-tantalato da Lavra Itatiaia.

De forma geral, as imagens BSE mostraram grãos bastante homogêneos. Fuchsloch *et al.* (2019), de outro modo, ao estudar Nb-tantalatos de pegmatitos da Namíbia, encontraram grãos exibindo diversos padrões de zonamento, indicando múltiplas fases de cristalização, o que não parece ser o caso das amostras analisadas no presente estudo. Em estudo de pegmatitos de Angola, Gonçalves *et al.* (2019) observaram que os minerais da série da columbita que não exibiam zonamento pertenciam aos pegmatitos menos evoluídos do campo pegmatítico estudado e indicariam crescimento a partir

da fase de fusão. Ryznar *et al.* (2023) observaram um padrão de zonamento múltiplo nas amostras de columbita-tantalita de pegmatitos de Ruanda, sugerindo modificação de composições primárias pelo fluido residual altamente fracionado e saturado em água e voláteis.

Os resultados das análises de MEV-EDS encontram-se sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados das análises de MEV-EDS.

Amostra	Elemento (% peso)										Espécie	Ta/(Ta+Nb)	Mn/(Mn+Fe)
	Nb	O	Ta	Fe	C	Mn	Ti	Si	Sn	Total			
ASA													
1.1	38,2	25,5	13,8	10,5	7,8	3	0,7			99,5	Columbita-(Fe)	0,27	0,22
1.2	38,3	24,9	13,2	10,8	8,8	3,2	0,8			100	Columbita-(Fe)	0,26	0,23
1.3	38	25	14,5	10,7	7	3	0,9			99,1	Columbita-(Fe)	0,28	0,22
1.4	38,4	25,5	13,9	10,5	6,6	3,1	0,9			98,9	Columbita-(Fe)	0,27	0,23
1.5	38,1	25,1	13,9	10,7	7,7	2,9	0,8			99,2	Columbita-(Fe)	0,27	0,21
média	38,2	25,2	13,86	10,64	7,58	3,04	0,82					0,27	0,22
2.1	37,1	24,4	12,7	10,2	9,1	2,9	0,8			97,2	Columbita-(Fe)	0,26	0,22
2.2	37,9	25	14,4	10,6	6,9	3,1	0,7			98,6	Columbita-(Fe)	0,28	0,23
2.3	38,6	25,3	14,2	10,6	6,6	3				98,3	Columbita-(Fe)	0,27	0,22
2.4	39,2	25,6	13,7	10,5	6,6	3,2	0,8			99,6	Columbita-(Fe)	0,26	0,23
2.5	37,7	24,4	14,3	10,8	7	2,9	0,9			98	Columbita-(Fe)	0,28	0,21
2.6	37,6	24,5	13,5	10,4	7,8	3	0,8			97,6	Columbita-(Fe)	0,26	0,22
média	38,02	24,87	13,80	10,52	7,33	3,02	0,80					0,27	0,22
ELU													
1.1	5,2	20,9	56,7	10,1						92,9	Tantalita-columbita	0,92	0,00
1.2	4,3	22	56,1	9,8	4,7					96,9	Tantalita-columbita	0,93	0,00
1.3	15,8	22,6	44,5	6,9		4,5				94,3	Tantalita-columbita	0,74	0,39
média	8,43	21,83	52,43	8,93	4,70	4,50						0,86	0,13
2.1	27,7	24	29,8	9,3	5,3	3,5				99,6	Tantalita-columbita	0,52	0,27
2.2	26,9	23,7	29,7	9,5	4,9	2,9				97,6	Tantalita-columbita	0,52	0,23
2.3	26,7	28,6	26,6	7,7	6,2	3,2				99	Tantalita-columbita	0,50	0,29
2.4	26,5	23	31,6	9,8		3				93,9	Tantalita-columbita	0,54	0,23
média	26,95	24,83	29,43	9,08	5,47	3,15						0,52	0,26
2.1	27,8	24,5	26,6	7,8	7,6	4,5				98,8	Tantalita-columbita	0,49	0,37
2.2	25,1	23,6	32,4	8	4,6	4,6				98,3	Tantalita-columbita	0,56	0,37
2.3	29,8	24,5	26,9	8,1	5,2	4,9				99,4	Tantalita-columbita	0,47	0,38
média	27,57	24,20	28,63	7,97	5,80	4,67						0,51	0,37
CAC													
1.1	33,4	25,8	19,3	8,8	6,7	4,1	1			99,1	Tapiolita-Fe	0,37	0,32
1.2	33,1	25,9	19,5	8,6	6,6	4	0,8			98,5	Tapiolita-Fe	0,37	0,32
1.3	33,2	25,9	18,8	8,8	6,4	4	0,8			97,9	Tapiolita-Fe	0,36	0,31
1.4	34,2	25,5	19,5	8,7	6,5	4,1	0,9			99,4	Tapiolita-Fe	0,36	0,32
1.5	33,5	25,4	19,5	8,8	6,5	4,4	1			99,1	Tapiolita-Fe	0,37	0,33
média	33,48	25,70	19,32	8,74	6,54	4,12	0,90					0,37	0,32
2.1	6,2	36,9	23,4	3,5	5,5	2,4		17,2	4,3	99,4	Wodginita	0,79	0,41
2.2	11,1	22,9	40,8	5,3	4,9	4,4			8,6	98	Wodginita	0,79	0,45

2.3	21	26,1	31	6	6,3	4,7	2,3	97,4	Tapiolita-Fe	0,60	0,44
2.4	17,1	22,4	39,5	7,1	5,1	4,2	0,8	96,2	Tapiolita-Fe	0,70	0,37
3.1	9,8	22,3	43,7	4,6	6,2	4,7	8,7	100	Wodginita	0,82	0,51
3.2	19	22,7	38,1	6,6	5,6	4,7		96,7	Tapiolita-Fe	0,67	0,42
3.3	19,2	22	39	6,1	5,8	5,8		97,9	Tapiolita-Fe	0,67	0,49
3.4	10	21,3	43,4	4,5	4,3	4,9	9,6	98	Wodginita	0,81	0,52
3.5	8,5	21,9	44	3,9	5,9	5,4	10,4	100	Wodginita	0,84	0,58
GEN											
1.1	17,2	21	43	9,2	5,2	2,7		98,3	Tantalita-(Fe)	0,71	0,23
1.2	16,8	20,6	43	9,5	5,1	2,6		97,6	Tantalita-(Fe)	0,72	0,21
1.3	16,5	20,4	43,9	9,1	5,2	2,7		97,8	Tantalita-(Fe)	0,73	0,23
1.4	17,2	20,6	43,4	9,7	4,6	2,4		97,9	Tantalita-(Fe)	0,72	0,20
1.5	16,7	20,5	44,4	9,7		2,7		94	Tantalita-(Fe)	0,73	0,22
1.6	18,1	20,7	42,3	9,6	4,5	2,6		97,8	Tantalita-(Fe)	0,70	0,21
média	17,08	20,63	43,33	9,47	4,92	2,62				0,72	0,22
CRU											
1.1	46,1	26,6	5,1	9,5	7,8	4,7		99,8	Columbita-(Fe)	0,10	0,33
1.2	45,3	26,8	4,9	9,9	8,2	4,3		99,4	Columbita-(Fe)	0,10	0,30
1.3	44,8	26,5	5,7	10	8,1	4,1		99,2	Columbita-(Fe)	0,11	0,29
1.4	45,2	26,4	5,7	9,2	8,2	4,8		99,5	Columbita-(Fe)	0,11	0,34
1.5	46,3	26,1	5,9	9,5	7,2	4,6		99,6	Columbita-(Fe)	0,11	0,33
1.6	45,2	26,8	5	8,5	8,3	5,9		99,7	Columbita-(Fe)	0,10	0,41
média	45,48	26,53	5,38	9,43	7,97	4,73				0,11	0,33
2.1	10,9	20,8	50,5		5,1	10,8		98,1	Tantalita-(Mn)	0,82	1,00
2.2	21,1	22,7	38,1		5,5	11,9		99,3	Tantalita-(Mn)	0,64	1,00
2.3	21	21,9	37		6,5	11,6		98	Tantalita-(Mn)	0,64	1,00
2.4	23,7	22,9	34,5		5,8	11,7		98,6	Tantalita-(Mn)	0,59	1,00
2.5	21,7	21,9	35,9		6,1	11,6		97,2	Tantalita-(Mn)	0,62	1,00
2.6	22,3	22,3	34,6		6,5	11,5		97,2	Tantalita-(Mn)	0,61	1,00
2.7	26	22,7	30,9		6,4	12		98	Tantalita-(Mn)	0,54	1,00
2.8	24	22,6	32,3		6,3	11,5		96,7	Tantalita-(Mn)	0,57	1,00
média	21,34	22,23	36,73		6,03	11,58				0,63	1,00
3.1	45	26,7	6,3	9,3	7,7	4,6		99,6	Columbita-(Fe)	0,12	0,33
3.2	44,7	25,9	6,9	8,6	7,6	5,3		99	Columbita-(Fe)	0,13	0,38
3.3	44,6	26,3	6	10	8,4	4,4		99,7	Columbita-(Fe)	0,12	0,31
3.4	44,2	26,2	7,2	9,8	8,3	4,4		100,1	Columbita-(Fe)	0,14	0,31
3.5	45,5	26	6,6	8,6	7,6	5,4		99,7	Columbita-(Fe)	0,13	0,39
3.6	46,1	26,5	5,2	9,6	7,4	5		99,8	Columbita-(Fe)	0,10	0,34
3.7	45,2	26,5	7,4	9,5	6,8	4,6		100	Columbita-(Fe)	0,14	0,33
3.8	45,6	25,8	6,6	9,3	7,1	5,2		99,6	Columbita-(Fe)	0,13	0,36
3.9	46	26	5,1	9,1	8,4	5,1		99,7	Columbita-(Fe)	0,10	0,36
média	45,21	26,21	6,37	9,31	7,70	4,89				0,12	0,34
ITA											
1.1	4,1	22,6	49,9	3,3		5,6	11,3	96,8	Wodginita	0,92	0,63
1.2	4,2	21,5	51,8	4,3		5,2	10	97	Wodginita	0,93	0,55
1.3	3,1	19,9	49,5	3,9	7,7	6,5	9,3	99,9	Wodginita	0,94	0,63
média	3,80	21,33	50,40	3,83	7,70	5,77	10,20			0,93	0,60
2.1	4,1	21,8	47,2	3	5,3	6	10,6	98	Wodginita	0,92	0,67
2.2	5,1	22,9	48,6	2,4		6,5	11,1	96,6	Wodginita	0,91	0,73

média	4,60	22,35	47,90	2,70	5,30	6,25	10,85			0,91	0,70
3.1	2	16	28,6	2,3	39,5	5,2	6,2	99,8	Wodginita	0,93	0,69
3.2	4,4	22,2	48	3,6		5,5	11,4	95,1	Wodginita	0,92	0,60
3.3	3,6	22,1	49,4	3,7		5,3	10,3	94,4	Wodginita	0,93	0,59
média	3,33	20,10	42,00	3,20	39,50	5,33	9,30			0,93	0,63

Com base nos valores obtidos para Ta, Nb, Fe e Mn, foi plotado o diagrama apresentado na Figura 11, que mostra a classificação das amostras analisadas na série da columbita-tantalita em função das razões entre Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe). Devido à presença de Sn em algumas das amostras analisadas, plotou-se também o diagrama ternário apresentado na Figura 12.

Como pode ser observado na Figura 11, a amostra da Mina da Água Santa correspondeu apenas à fase columbita-(Fe). A amostra de origem eluvionar mostrou composições entre columbita-(Fe) e tantalita-(Fe). As fases identificadas na amostra da Mina da Cachoeira foram wodginita e tapiolita-(Fe), não correspondendo à série da columbita-tantalita, mas com variações consideráveis nas razões Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe); não foi identificada a fase ixiolita, previamente reportada por Dias e Chaves (2015) em amostras desta mina. A amostra da Lavra da Generosa apresentou somente a fase tantalita-(Fe). Já a amostra da Mina do Cruzeiro revelou a presença tanto de columbita-(Fe) quanto de tantalita-(Mn). Por fim, a amostra da Lavra Itatiaia apresentou unicamente a fase wodginita, com altas razões Ta/(Ta+Nb). A fase columbita-(Mn) não foi observada nas amostras analisadas. Em estudo de pegmatitos da Espanha, Garate-Olave *et al.* (2020) atribuíram a presença de columbita-(Mn) aos pegmatitos com maior grau de fracionamento.

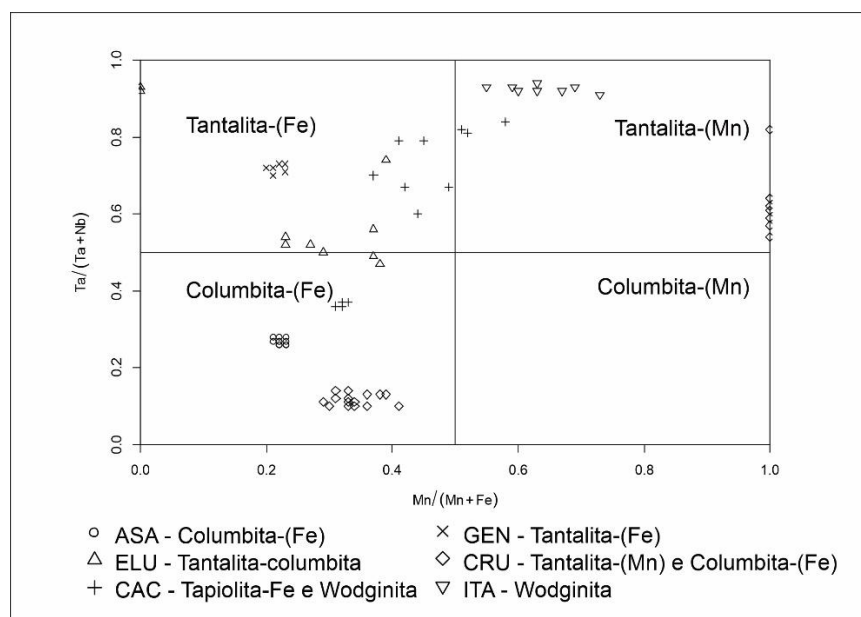


Figura 11: Diagrama Ta/(Ta+Nb) x Mn/(Mn+Fe) mostrando a classificação das amostras analisadas na série da columbita-tantalita.

Segundo Martins *et al.* (2011), na série da columbita-tantalita as razões Ta/Nb e Mn/Fe aumentam de acordo com o grau de fracionamento químico no interior do pegmatito. Desta forma, com base nas amostras analisadas, os pegmatitos da Cachoeira, Itatiaia e Cruzeiro mostram os mais elevados graus de fracionamento. De fato, conforme afirmam Morteani *et al.* (2000), os distritos pegmatíticos de Araçuaí e São José da Safira apresentam as variações mais amplas de fracionamento, se destacando como os maiores produtores de turmalina gemológica, água-marinha e morganita, contendo ainda grandes quantidades de espodumênio, tantalita e columbita. De forma semelhante, Kolawole *et al.* (2021) conduziram análises geoquímicas em pegmatitos da Nigéria e os maiores valores de Nb, Ta e Sn foram observados nos pegmatitos mais evoluídos. Assim, a presença de minerais que confirmam este elevado grau de fracionamento aponta para o grande potencial econômico dos pegmatitos

destes distritos, não somente com relação aos minerais gemológicos, mas principalmente aqueles minerais contendo metais raros como Li, Ta e Nb.

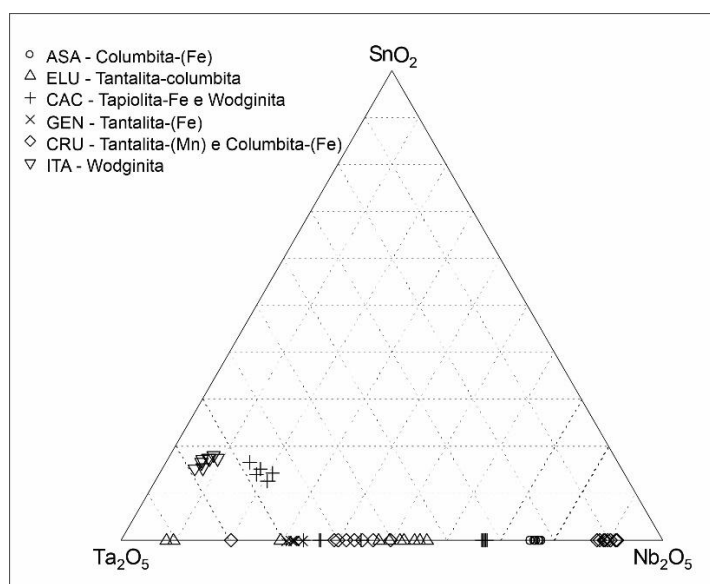


Figura 12: Diagrama ternário mostrando os conteúdos relativos de Ta_2O_5 , Nb_2O_5 e SnO_2 . A fase contendo Sn é representada pela wodginita.

CONCLUSÃO

As análises de MEV-EDS revelaram, no geral, grãos homogêneos e resultados condizentes com os das análises de DRX. Com base nos diagramas composicionais, as amostras apresentaram variação entre as fases columbita-(Fe), tantalita-(Fe) e tantalita-(Mn), além de wodginita e tapiolita-(Fe). A fase columbita-(Mn) não foi observada. Os resultados desta pesquisa permitiram ampliar o conhecimento sobre as fases minerais contendo nióbio e tântalo em depósitos de Minas Gerais, contribuindo ainda com o desenvolvimento de suas futuras aplicações.

AGRADECIMENTOS

À UEMG João Monlevade pela infraestrutura disponibilizada para desenvolvimento do projeto, à Mina da Água Santa (Coronel Murta), em nome do funcionário Eliezer, à Mina do Cruzeiro (São José da Safira), em nome do proprietário Douglas Neves e do geólogo Fernando Pifano, e à CBL (Araçuaí), em nome do engenheiro Mitsuru Kataoka, por nos receber e ceder amostras para estudo. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo apoio financeiro por meio da Chamada 01/2021 de Demanda Universal (projeto APQ-02543-21).

REFERÊNCIAS

ANTHONY, J.W.; BIDEAUX, R.A.; BLADH, K.W.; NICHOLS, M.C. (Eds.). **Handbook of Mineralogy**. Chantilly: Mineralogical Society of America. Disponível em: <http://www.handbookofmineralogy.org/>. Acesso em: 29 mar. 2023.

AUSTRALIAN GOVERNMENT. **Australian Critical Minerals Prospectus 2020**. Australian Government, Australian Trade and Investment Commission, Geoscience Australia, Department of Industry, Science, Energy and Resources, 2020. 172 p. Disponível em: <https://minedocs.com/23/Australian-Critical-Minerals-Prospectus-October-2020.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3133/ofr20131008>.

BARBOSA, C. C. **Caracterização estrutural, mineralógica e química mineral do pegmatito Bananal:** um depósito de lítio do Campo Pegmatítico de Curralinho, Salinas, MG. 2021. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

BLENGINI, G.A.; EL LATUNUSSA, C.; EYNARD, U.; MATOS, C.T.; WITTMER, D.; GEORGITZIKIS, K.; PAVEL, C.; CARRARA, S.; MANCINI, L.; UNGURU, M.; BLAGOEVA, D.; MATHIEUX, F.; PENNINGTON, D. **Study on the EU's list of Critical Raw Materials.** Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. ISBN 978-92-76-21049-8. DOI: 10.2873/11619. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344124852_Study_on_the_EU's_list_of_Critical_Raw_Materials_2020_Final_Report. Acesso em: 21 jun. 2025.

BRADLEY, D.C.; MCCAULEY, A.D.; STILLINGS, L.M. **Mineral-deposit model for lithium-cesium-tantalum pegmatites. U.S.** Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5070-O, 48 p., 2017. ISSN 2328-0328 (online). DOI: <https://doi.org/10.3133/sir20105070O>.

BRASIL. DECRETO Nº 10.657, DE 24 DE MARÇO DE 2021. Brasília: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm. Acesso em: 19 jun. 2025.

BRASIL. Plano Nacional de Mineração 2050: Sustentabilidade e Competitividade. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2022. 91 p. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=deaa585a-197a-f5e6-f347-b12d65ea878b&groupId=404993. Acesso em: 19 jun. 2025.

DIAS, C.H.; CHAVES, M.L.S.C. Uncommon Nb-tantalate from the Cachoeira mine, Araçuaí pegmatite district (Minas Gerais). **Revista Escola de Minas**, v. 68, n. 4, p. 401-408, 2015.

DIAS, C.H. **Mineralogia, tipologia e causas de cor de espodumênios da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e química mineral de Nb-tantalatos da mina da Cachoeira (Minas Gerais).** 2015. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

DILL, H. Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. **Ore Geology Reviews**, v. 69, p. 417-561, 2015.

DOLGANOVA, I.; BOSCH, F.; BACH, V.; BAITZ, M.; FINKBEINER, M. Life cycle assessment of ferro niobium. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 3, p. 611-619, 2020. DOI: 10.1007/s11367-019-01714-7.

DUURING, P. **Rare-element pegmatites: a mineral systems analysis.** Geological Survey of Western Australia, Record 2020/7, 6p., 2020.

ERCIT, T.S.; HAWTHORNE, F.C.; ČERNÝ, P. The wodginite group. I. Structural crystallography. **Canadian Mineralogist**, v. 30, p. 597-611, 1992.

ERCIT, T.S.; WISE, M.A.; ČERNÝ, P. Compositional and structural systematics of the columbite group. **American Mineralogist**, v. 80, p. 613-619, 1995.

FUCHSLOCH, W.C.; NEX, P.A.M.; KINNAIRD, J.A. The geochemical evolution of Nb-Ta-Sn oxides from

pegmatites of the Cape Cross–Uis pegmatite belt, Namibia. **Mineralogical Magazine**, v. 83, p. 161–179, 2019. DOI: 10.1180/mgm.2018.151.

GARATE-OLAVE, I.; RODA-ROBLES, E.; GIL-CRESPO, P.P.; PESQUERA, A.; ERRANDONEA-MARTIN, J. The Tres Arroyos Granitic Aplite-Pegmatite Field (Central Iberian Zone, Spain): Petrogenetic Constraints from Evolution of Nb-Ta-Sn Oxides, Whole-Rock Geochemistry and U-Pb Geochronology. **Minerals**, v. 10, n. 11, 1008, 2020. DOI:10.3390/min10111008.

GONÇALVES, A.O.; MELGAREJO, J.-C.; ALFONSO, P.; AMORES, S.; PANIAGUA, A.; NETO, A.B.; MORAIS, E.A.; CAMPRUBÍ, A. The Distribution of Rare Metals in the LCT Pegmatites from the Giraúl Field, Angola. **Minerals**, v. 9, n.10, 580, 2019. DOI: 10.3390/min9100580.

GOVERNMENT OF CANADA. **Canada's Critical Minerals List 2021**. Natural Resources Canada, 2021. Cat. No. M31-19E-PDF (Online) ISSN 2563-8017. Disponível em: https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/mineralsmetals/pdf/Critical_Minerals_List_2021-EN.pdf. Acesso em: 19 jun. 2025.

GRAEDEL, T.E.; RECK, B.K.; MIATTO, A. Alloy information helps prioritize material criticality lists. **Nature Communications**, v. 13, 150, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27829-w>.

GROHOL, M.; VEEH, C. **Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023** – Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. ISBN: 978-92-68-00414-2. DOI:10.2873/725585. Disponível em: https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en. Acesso em: 19 jun. 2025.

KENDALL-LANGLEY, L.A.; KEMP, A.I.S.; GRIGSON, J.L.; HAMMERLI, J. U-Pb and reconnaissance Lu-Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li-Cs-Ta type pegmatites of Western Australia. **Lithos**, v. 352–353, 2020, ISSN 0024-4937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105231>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493719303901>. Acesso em: 21 jun. 2025.

KOLAWOLE, M.S.; IDAKWO, S.O.; AMEH, E.G. Sn-Ta-Nb mineralization potential of pegmatitic bodies in Bunu area, part of Kabba-Lokoja-Igarra Schist Belt, SW Nigeria. **Lithos**, v. 400–401, 2021. ISSN: 0024-4937. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106426>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002449372100462X>. Acesso em: 27 jun. 2025.

LINNEN, R.L.; VAN LICHTERVELDE, M.; ČERNÝ, P. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. **Elements**, v. 8, p. 275–280, 2012.

LONDON, D. **Pegmatites**. Canadian Mineralogist Special Publication 10, 368 p., 2008.

MARTINS, T.; LIMA, A.; SIMMONS, W.B.; FALSTER, A.U.; NORONHA, F. Geochemical fractionation of Nb-Ta oxides in Li-bearing pegmatites from the Barroso-Alvão pegmatite field, Portugal. **Canadian Mineralogist**, v. 49, p. 777–791, 2011.

MELCHER, F.; GRAUPNER, T.; GÄBLER, H.-E.; SITNIKOVA, M.; OBERTHÜR, T.; GERDES, A.; BADANINA, E.; CHUDY, T. Mineralogical and chemical evolution of tantalum–(niobium–tin) mineralisation in pegmatites and granites. Part 2: Worldwide examples (excluding Africa) and an overview of global metallogenetic patterns. **Ore Geology Reviews**, v. 89, p. 946–987, 2017.

MORTEANI, G.; PREINFALK, C.; HORN, A.H. Classification and mineralization potential of the pegmatites of the Eastern Brazilian Pegmatite Province. **Mineralium Deposita**, v. 35, p. 638-655, 2000.

NAKANO, J. **The geopolitics of critical minerals supply chains**. Washington: Center for Strategic & International Studies, 2021. 38 p. Disponível em: https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/210311_Nakano_Critical_Minerals.pdf?VersionId=DR03x5jlrwLnNjmPDD3SZjEkGEZFECgt. Acesso em: 19 jun. 2025.

NETTO, C.; ARAÚJO, M.C.; PINTO, C.P.; DRUMOND, J.B. **Projeto Leste**: Cadastramento de Recursos Minerais - Pegmatitos. Belo Horizonte: SEME/COMIG/MME/CPRM, v. 1, 210 p., 1998.

PEDROSA-SOARES, A.C.; CHAVES, M.L.S.C.; SCHOLZ, R.; DIAS, C.H. PEG2009 Pre-Symposium Field Trip Guide: Eastern Brazilian Pegmatite Province (Minas Gerais). **Estudos Geológicos**, v. 32, n. 2, p. 37-51, 2022. ISSN: 1980-8208. DOI: <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v32n2p37-51>.

PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS, C.P.; NOCE, C.; SILVA, L.C.; NOVO, T.; RONCATO, J.; MEDEIROS, S.; CASTAÑEDA, C.; QUEIROGA, G.; DANTAS, E.; DUSSIN, I.; ALKMIM, F. Late Neoproterozoic – Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil) the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. **Geologic Society, Special Publications**, 350, 2011. p. 25-51. ISSN: 2041-4722. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP350.3>.

RAJAK, D.K.; JORDAAN, R.; GÓMEZ-ARIAS, A.; PURCELL, W. Extractive metallurgy of columbite-tantalite ore: A detailed review. **Minerals Engineering**, v. 190, 2022, 107917. ISSN: 0892-6875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107917>.

RYZNAR, J.; PRŠEK, J.; WŁODEK, A.; UHER, P. Mineralogy and chemistry of columbite-tantalite from Bugarura-Kuluti area, Karagwe-Ankole Belt, Rwanda: Indicators of pegmatite and granite evolution. **Ore Geology Reviews**, v. 159, 2023. ISSN: 0169-1368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105574>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136823002901>. Acesso em: 27 jun. 2025.

SILVEIRA, J.W.; RESENDE, M. Competition in the international niobium market: A residual demand approach. **Resources Policy**, v. 65, 2020, 101564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101564>.

SILVEIRA, L.A.G. da; Chaves, M.L.deS.; KRAMBROCK, K.; MENEZES FILHO, L.A.D.; BRANDÃO, P.R.G.; SCHOLZ, R.; COSTA, M.A.F. Ocorrência, contexto mineralógico e química mineral da brazilianita e seus depósitos em Minas Gerais. **Revista Geociências UNESP**, v. 33, n. 3, p. 378-392, 2014.

U.S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2020**. Reston: U.S. Geological Survey, 2020. 200 p. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2020>. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.

VECCI, A.N.; COSTA, F.C.; COSTA, J.C.V.; BELOTTI, F.M.; GRAÇA, L.M.; CIPRIANO, R.A.S. Caracterização mineralógica e química de columbita-tantalita de pegmatitos de Minas Gerais. In: COSTA, F.C.; OLIVEIRA, F.B.; CIPRIANO, R.A.S. (Organizadores), **Mineralogia e Gemologia** [recurso eletrônico]. Alegre: CAUFES, 2022. 114 p. Disponível em: <https://geologia.ufes.br/e-book>. Acesso em: 30 mai. 2024.

VIDAL, F.W.H.; NOGUEIRA NETO, J.A. Minerais de pegmatitos. In: VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A. DA C.; SOUSA, J.F. DE; MATTOS, I.C. (Organizadores), **Rochas e Minerais Industriais**

do Estado do Ceará. Fortaleza: CETEM, 2005. p. 67-81.

VON RENNENBERG, T.S.F. **Towards a circular economy of critical raw materials:** The case of niobium. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculty of Behavioural, Management and Social Sciences, University of Twente, Enschede, 2021. Disponível em: https://essay.utwente.nl/87807/7/87807_Freien%20von%20Rennenberg_MA_BMS.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

WILLIAMS-JONES, A.E.; VASYUKOVA, O.V. Niobium, Critical Metal, and Progeny of the Mantle. **Economic Geology**, v. 118, n. 4, p. 837–855, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5382/econgeo.4994>. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/segweb/economicgeology/article-abstract/118/4/837/618877/Niobium-Critical-Metal-and-Progeny-of-the-Mantle?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 19 jun. 2025.

ZENG, X.; GÓMEZ, M.; BAKRY, M.; GENG, Y; LI, J. Anthropogenic mineral generation and its potential resource supply: The case of niobium. **Science China Earth Sciences**, v. 67, n. 8, p. 2583–2591, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1349-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-023-1349-2>. Acesso em: 19 jun. 2025.