

USO DA DENSIDADE PARA ESTIMAR O TEOR DE TÂNTALO NA COLUMBITA-TANTALITA: APLICAÇÃO AO PEGMATITO UBAEIRA, CURRAIS NOVOS (RN)

João Adauto de Souza Neto¹

Carlos Eduardo Fernandes de Souza Costa²

¹Departamento de Geologia, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. e-mail: adauto@ufpe.br

²Curso de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. e-mail: cefcsc2001@yahoo.com.br

RESUMO As aplicações do tântalo (Ta) estão aumentando, provocando uma procura intensa por este metal. A tantalita [(Fe,Mn)Ta₂O₆], uma das principais fontes de Ta, ocorre como columbita-tantalita [(Fe,Mn)(Nb,Ta)₂O₆] nos pegmatitos da Província Pegmatítica do Seridó (RN-PB). O preço deste último mineral é função do teor de Ta, o que torna imprescindível a determinação exata do conteúdo desse metal. Neste trabalho, a densidade é aplicada como um método prático e barato para se determinar o teor de Ta na columbita-tantalita. A série da columbita-tantalita é uma solução-sólida envolvendo a substituição mútua de Nb e Ta, e de Fe e Mn. Nesta série a densidade é aproximadamente proporcional ao teor de Ta, sendo portanto possível obter o teor desse metal utilizando-se a densidade. A densidade foi obtida pelas técnicas do volume deslocado e picnômetro. Pela primeira técnica obteve-se valores de densidade variando de 5,2 a 7,0 g/cm³, enquanto que pela técnica do picnômetro, estes valores variaram de 5,53 a 5,79 g/cm³. A técnica do picnômetro, considerada mais precisa, foi utilizada para determinar os teores de Ta variando entre 8,62 e 15,41 % (10,52-18,81 % de Ta₂O₅) nas amostras testadas. A utilização da densidade para o fim exposto revela boas perspectivas de aplicação, uma vez que a mesma contornaria problemas de custo e dificuldades analíticas ligados às análises químicas do Ta. O uso da densidade torna-se viável considerando-se sua praticidade e baixo custo, pois utiliza materiais analíticos de uso simples e baratos, permitindo a determinação do Ta no próprio garimpo e promovendo uma rápida avaliação do minério.

Palavras-chave: tântalo, densidade, columbita-tantalita

ABSTRACT USE OF DENSITY TO DETERMINE TANTALUM CONTENTS IN THE COLUMBITE-TANTALITE: APPLICATION TO THE UBAEIRA PEGMATITE, CURRAIS NOVOS (RN) The increasing uses of tantalum (Ta) are promoting a run for this metal. The tantalite [(Fe,Mn)Ta₂O₆] is one of the main source of Ta. In pegmatites from the Seridó pegmatitic province (Rio Grande do Norte and Paraíba states) Ta occurs as columbite-tantalite [(Fe,Mn)(Nb,Ta)₂O₆]. The price of the latter mineral is a function of its Ta amount, which creates a necessity for determining it. In this work density was applied as a practical and cheap method for determining Ta in the columbite-tantalite. The columbite-tantalite is a solid solution involving Nb-Ta and Fe-Mn where the density is proportional to the Ta amount. Therefore, the density could be used to obtain the amount of this metal. The

density was obtained by two techniques: displaced volume and picnometer. The first one revealed densities between 5.2 and 7.0 g/cm³, while the picnometer technique shown densities ranged from 5.53 to 5.79 g/cm³. The picnometer is considered more precise. Consequently densities obtained by this technique were used to determine Ta amounts in the columbite-tantalite, which ranged from 8,62 to 15,41 % of Ta (10,52-18,81 % of Ta₂O₅) in the tested samples. The use of density to this reveals good application perspectives, since its utilization could tackle problems related to cost and analytical difficulties of the chemical analyses of Ta. Moreover, this method could be viable considering its practical and low cost aspects (it uses simple and cheap analytical materials), promoting the Ta determination in the site of exploitation and a rapid ore evaluation.

Keywords: tantalum, density, columbite-tantalite

INTRODUÇÃO

Com o avanço da indústria eletrônica mundial as aplicações do Tântalo (Ta) estão cada vez mais amplas e diversificadas (Cunningham 1985). Nesta indústria o Ta é utilizado como pó-metálico na fabricação de capacitores (reguladores de fluxo de eletricidade nos circuitos integrados) para equipamentos eletrônicos como telefones celulares, computadores, equipamentos digitais (e.g. vídeos, câmeras), e circuitos eletrônicos diversos, como aqueles usados em automóveis e equipamentos médicos. Na forma de óxido, o Ta também é aplicado na manufatura de vidros especiais com um alto índice de refração utilizado em lentes para câmeras. Uma fração menor do Ta produzido no mundo é utilizada na fabricação de aços especiais, resistentes à corrosão e também a altas temperaturas (possui um elevado ponto de fusão: 3.017 °C), além de boa ductilidade. As aplicações de tais aços vão desde a fabricação de turbinas na indústria aeronáutica, até fuselagem de espaçonaves, manufatura de mísseis e ferramentas de corte (na forma de carbetos de tântalo: TaC).

O preço do Ta no mercado internacional varia em função de novos usos e aplicações, mas também do crescimento na produção de um determinado equipamento eletrônico. Como exemplo, na última década os preços variaram desde cerca de US\$ 220 –

US\$ 250 por quilo do Ta (Kesler 1994), chegando a alcançar cerca de US\$ 430 por quilo desse metal (valor estimado considerando-se que nos garimpos a tantalita bruta chegou a ser comercializada a US\$ 300 por quilo, sendo que de acordo com sua composição química ideal esta poderia conter até 70,5 % de Ta). Este último valor de mercado mais elevado foi constatado na Província Pegmatítica do Seridó (PPS) nos estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, no início do ano 2000, época em que houve um considerável aumento da demanda mundial para telefones celulares.

No Brasil, um dos principais produtores de Ta (Kesler 1994), explora-se principalmente a columbita-tantalita, em corpos pegmatíticos como os que ocorrem na PPS. Como o preço desse mineral-minério aumenta em função do seu teor de Ta, a determinação do teor desse metal é de extrema necessidade para a avaliação econômica de seus depósitos.

Os métodos analíticos habitualmente usados para determinação do Ta são fluorescência de raios-x, espectrometria de plasma (ICP) e ativação neutrônica. Este último método é o que possui o mais baixo limite de detecção (0,5 ppm) e a melhor precisão analítica, além de não apresentar limite máximo de teor para análise (Rollison 1996). O preço de uma análise de Ta em columbita-

tantalita pode chegar a US\$ 60, sendo que as análises de melhor qualidade (e.g. ativação neutrônica) ainda necessitam ser feitas fora do Brasil.

Visando contornar tais dificuldades para a análise do Ta na columbita-tantalita, este trabalho tem por objetivo apresentar um exemplo de aplicação da densidade relativa para estimar a concentração de Ta neste mineral. Ressaltam-se os aspectos de praticidade e baixo custo dessa aplicação, que permitem a determinação de Ta no próprio garimpo. Para este fim, a densidade da columbita-tantalita foi determinada pelas técnicas do **volume deslocado** e do **picnômetro**, utilizando-se proveta, picnômetro e balança. O objetivo do uso de duas diferentes técnicas foi verificar se os dados obtidos pela técnica do volume deslocado teriam qualidade suficiente para eventualmente substituir o picnômetro (melhor precisão). O uso unicamente do volume deslocado acarreta uma maior praticidade, pois possui procedimento ainda mais prático e usa materiais mais simples em relação à técnica do picnômetro.

O uso da densidade para estimar o teor de Ta no mineral em questão é conhecido desde a década de 40 (Adusumilli 1978), sendo que o mesmo toma como base o fato de que na columbita-tantalita a densidade varia significativamente de forma proporcional ao teor de Ta.

A columbita-tantalita constitui uma solução-sólida onde ocorre a substituição entre Nb e Ta, e entre Fe e Mn, e a composição química varia entre a columbita pura $[(Fe,Mn)Nb_2O_6]$ e a tantalita pura $[(Fe,Mn)Ta_2O_6]$, possuindo ainda ferro-columbita ($FeNb_2O_6$), mangano-columbita ($MnNb_2O_6$), ferro-tantalita ($FeTa_2O_6$) e mangano-tantalita ($MnTa_2O_6$) como termos intermediários. No grupo da columbita-tantalita inclui-se também a magnésio-columbita $[(Mg,Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6]$ - Foucault & Raoult (1995). Além dos elementos químicos citados, a columbita-tantalita ainda pode

conter pequenas quantidades de Sn, W e U (Dana & Hurlbut 1976, Gaines *et al.* 1997). A columbita e a tantalita apresentam propriedades físicas semelhantes, sendo que ambos são do sistema cristalino ortorrômbico-bipiramidal, apresentando cristais com formas prismática curta (tantalita) e tabular delgada (columbita). Esses minerais podem apresentar hábito maciço, granular e tabular. Possuem cor preta, brilho sub-metálico e traço castanho escuro. São translúcidos a opacos e apresentam clivagem [010] distinta. A densidade relativa (d) da columbita-tantalita oscila entre 5,2 g/cm³ (columbita) e 7,9 g/cm³ (tantalita), variando de acordo com sua composição química, sendo tanto maior quanto maior for o teor de Ta presente. Excepcionalmente, a densidade pode ultrapassar esse limite superior com o aumento significativo de Fe (ferro-tantalita, d = 8,2 g/cm³) ou Mn (mangano-tantalita, d = 8,1 g/cm³) na composição da série columbita-tantalita, ou ficar abaixo do limite inferior com a presença de Mg (magnésio-columbita, d = 5,04 g/cm³) - Dana & Hurlbut (1976), Foucault & Raoult (1995), Gaines *et al.* (1997).

ASPECTOS GEOLÓGICOS DA PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DO SERIDÓ

As amostras de columbita-tantalita utilizadas neste trabalho são provenientes do pegmatito Ubadeira. Este pegmatito insere-se regionalmente na PPS, a qual engloba parte dos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, e ocorre em uma faixa alongada segundo a direção NE-SW, medindo cerca de 80 quilômetros de largura por 150 quilômetros de extensão. Nesta província ocorrem vários corpos pegmatíticos mineralizados em metais raros como Be, Ta, Nb, Li e Sn (Johnston Jr. & Vasconcelos 1945, Ebert 1970, Da Silva & Dantas 1984, Beurlen 1995, Da Silva *et al.* 1995), tendo atualmente cerca de 1.500 corpos cadastrados. Na maioria dos pegmatitos dessa região ainda são apro-

veitados economicamente feldspatos, muscovita, quartzo, caulinita e gemas, como água marinha, ametista, turmalinas, esmeralda, granada e euclásio (Da Silva *et al.* 1995, Jesus 2000).

A composição mineralógica dos pegmatitos inclui essencialmente feldspato alcalino, albita, quartzo, biotita, muscovita e turmalina. São rochas ordovicianas com idades variando entre 510 e 450 Ma (Ebert 1970, método K-Ar; McMurry *et al.* 1987, método Rb-Sr em muscovita) e ocorrem como corpos intrusivos principalmente nos xistos da cobertura supracrustal (Formação Seridó, de idade neoproterozóica - Van Schmus *et al.* 2003), sendo menos abundantes nos quartzitos (Formação Equador, subjacente a tais xistos) dessa cobertura, assim como nos litotipos do embasamento gnáissico-migmatítico (arqueano a paleoproterozóico - Van Schmus *et al.* 2003). A forma dos corpos pode ser tabular ou lenticular, e possuem dimensões variando de dezenas a centenas de metros de comprimento e largura variável de escala métrica a decamétrica. Podem ocorrer tanto como corpos concordantes como discordantes em relação à estruturação tectônica principal da região (direção NE-SW) e são de três tipos: homogêneo, heterogêneo e misto (Ebert 1970, Da Silva *et al.* 1995, Araújo *et al.* 2001).

Estes corpos pegmatíticos mostram uma relação preferencial entre tipo, presença/ausência de mineralização, forma e direção de ocorrência. Assim, os pegmatitos do tipo homogêneo são normalmente estéreis, possuem forma tabular e ocorrem orientados segundo a direção N-S. Os pegmatitos heterogêneos são mineralizados, possuem geralmente forma lenticular (elipsoidal), e estão orientados ao longo da direção NE-SW. Além disso, apresentam maior grau de diferenciação mineralógica em relação aos pegmatitos homogêneos, e seus minerais

ocorrem distribuídos em até quatro zonas, que definem um típico zoneamento (horizontal e vertical). Estas zonas ocorrem dispostas simetricamente da borda para o centro dos corpos, e contêm nesse sentido: (i) muscovita-quartzo (feldspatos), (ii) quartzo-feldspatos (frequentemente com textura gráfica), (iii) feldspatos (grandes cristais)-berilo-espodumênio e (iv) quartzo (núcleo maciço). Os pegmatitos do tipo misto possuem características variáveis entre aquelas pertencentes aos pegmatitos homogêneos e aos heterogêneos (Da Silva *et al.* 1995, Araújo *et al.* 2001).

MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizadas 15 amostras de concentrado de cristais (diâmetro variável entre 1 e 2 centímetros, apresentando portanto diferentes volumes) de columbita-tantalita representativas do corpo pegmatítico Ubaeira. Este corpo está localizado à aproximadamente 140 quilômetros à sudoeste de Natal, no município de Currais Novos, estado do Rio Grande do Norte (Figura 1). O pegmatito Ubaeira é um dos mais expressivos da região enfocada, quando considerada sua dimensão (cerca de 30-40 metros de largura e uma extensão de pelo menos 200 metros) e o caráter bem definido de sua zonação.

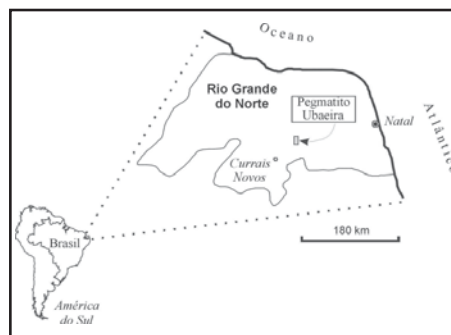


Figura 1 – Mapa de localização do pegmatito Ubaeira.

Para as análises de densidade relativa foram utilizadas as técnicas de volume deslocado e picnômetro. Nas análises por volume deslocado foram utilizadas três provetas, uma com capacidade de 25 ml, e as outras duas sendo de 50 ml. Cada uma dessas provetas possuía diâmetro diferente, de modo a atender aos vários tamanhos das amostras utilizadas. As provetas também possuíam diferentes valores para a menor unidade de graduação, sendo estes de 0,2, 0,5 e 1 ml, respectivamente. Portanto, a precisão de leitura de cada uma das provetas era diferente, estimada em metade do valor da menor unidade de graduação. Utilizou-se ainda água destilada e uma balança analítica digital da marca AND, modelo HR-202, com limite de detecção de 0,0001 g.

Um picnômetro de 50 ml foi utilizado para análise de densidade. O picnômetro é um pequeno frasco de vidro, adaptado com uma rolha também de vidro, na qual existe uma abertura capilar. Nestas análises utilizou-se também água destilada, que é uma exigência à aplicação da técnica do picnômetro, além da mesma balança digital usada nas análises pela técnica do volume deslocado.

TÉCNICAS ANALÍTICAS USADAS PARA AS ANÁLISES DE DENSIDADE

Inicialmente as amostras de columbita-tantalita utilizadas neste trabalho passaram por uma descrição macroscópica, com o auxílio de lupa (aumento de 20x). Com base nesta descrição, verificou-se que existiam amostras constituídas por cristais tanto com hábito cristalino (forma externa) maciço como com hábito cristalino tabular. Em uma avaliação preliminar (diferença aparente de peso entre amostras de volume aproximadamente igual), constatou-se uma aparente diferença de densidade entre as amostras apresentando hábitos diferentes. Com base nesta avaliação, as amostras de hábito cristalino maciço teriam densidades re-

lativamente maiores em relação às amostras de hábito cristalino tabular. Isso parece coerente quando correlaciona-se: (i) hábito cristalino maciço com forma do cristal do tipo prismática curta, caso típico da tantalita (mencionado anteriormente), que apresenta densidade relativamente maior e, (ii) hábito cristalino tabular com forma do cristal do tipo tabular delgada, caso típico da columbita (mencionado anteriormente), que apresenta densidade relativamente menor. A relação entre hábito cristalino e baixo teor de Ta (e.g. columbita) já havia sido descrita nos pegmatitos da Província Borborema por Da Silva *et al.* (1995), que relatam a associação entre columbita-tantalita com hábito tabular e teores mais baixos de Ta.

Posteriormente, as amostras a serem analisadas passaram por uma separação em alíquotas, em função da aparente diferença de densidade observada. Dessa forma, as amostras foram separadas em duas classes (amostras 1 e 2). A Amostra 1 compreende as amostras de densidade relativamente maior (hábito maciço), incluindo 6 alíquotas, denominadas de 1A a 1F. A Amostra 2 refere-se às amostras de menor densidade (hábito tabular), compreendendo 9 alíquotas, denominadas de 2A a 2I.

Em seguida, todos os cristais de columbita-tantalita das 15 alíquotas (amostras 1 e 2) passaram por uma etapa de purificação para remoção de incrustações de outros minerais. Nesta etapa removeu-se, com auxílio de lupa e canivete, placas de muscovita e fragmentos de feldspatos. Esta remoção deixou as amostras mais puras, evitando-se assim que os resultados das análises de densidade sofressem interferência de outros minerais.

Após esta etapa, foram executadas as análises de densidade relativa por duas técnicas diferentes: **volume deslocado** e **picnômetro**.

VOLUME DESLOCADO

O procedimento para as análises de densidade pela técnica do volume deslocado consistiu de três etapas:

- (i) Pesagem da amostra;
- (ii) Verificação do volume de água deslocado pela amostra na proveta;
- (iii) Cálculo da densidade relativa (**d**) através da seguinte fórmula:

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{equação (1)}$$

onde **m** é a massa da amostra obtida em (i), e **v** é o volume da amostra verificado em (ii).

Na prática, as amostras foram primeiramente pesadas. Durante a obtenção do peso das amostras esperou-se cerca de 1 minuto para o registro da leitura, uniformemente para todas as amostras, a fim de que houvesse a estabilização do valor do peso na balança. Em seguida, utilizando-se uma proveta com água destilada até cerca de $\frac{3}{4}$ do seu volume total (para se obter uma altura da coluna de água tal que facilitasse a leitura do volume na proveta sobre a bancada), colocou-se a amostra dentro da proveta e verificou-se o volume de água deslocado. Este volume deslocado, segundo o princípio de Arquimedes, é igual ao volume do material imerso (amostra). De posse do peso e do volume de cada amostra, estes valores foram substituídos na equação (1), a partir da qual calculou-se o valor da densidade relativa.

PICNÔMETRO

Quanto às análises de densidade através da técnica do picnômetro, obteve-se para cada amostra, o peso do picnômetro vazio (P_p), o peso do picnômetro com a amostra dentro (P_{p+m}), o peso do picnômetro com a amostra dentro e preenchido com água (P_{p+m+a}) e, final-

mente, o peso do picnômetro somente com água (P_{p+a}). Para o registro da leitura do peso na balança esperou-se a estabilização do valor, seguindo o mesmo padrão adotado para a técnica do volume deslocado. De posse desses vários pesos, os valores dos mesmos foram substituídos na fórmula do cálculo da densidade pela técnica do picnômetro (Dana & Hurlbut 1976):

$$d = \frac{(P_{p+m} - P_p)}{(P_{p+a} + P_{p+m} - P_p - P_{p+m+a})} \quad \text{equação (2)}$$

Para algumas alíquotas foi necessário reduzir o seu tamanho para possibilitar a passagem pela abertura do picnômetro, que era de aproximadamente 1 centímetro de diâmetro. Neste caso, todos os fragmentos de uma mesma alíquota foram introduzidos juntos dentro do picnômetro para a obtenção da densidade. Isto é possível uma vez que esta técnica possibilita a obtenção, com exatidão, da densidade relativa de amostras sob forma de agregado de fragmentos ou em pó (Dana & Hurlbut 1976).

RESULTADOS DE DENSIDADE

Pela técnica do **volume deslocado** as densidades obtidas para as 15 alíquotas das amostras 1 e 2 variaram entre 5,0 e 7,0 g/cm³ (Tabela 1). Para o menor valor observado (5,0 g/cm³; amostra 2G), provavelmente trata-se de um erro analítico, visto que obteve-se um valor maior de densidade (5,67 g/cm³), para essa mesma amostra através da técnica do picnômetro, considerada mais precisa (ver adiante). Dessa forma, desconsiderando-se o único valor abaixo de 5,2 g/cm³, tem-se que os valores de densidade relativa obtidos variam de 5,2 a 7,0 g/cm³.

Tabela 1 – Valores de densidade obtidos pela técnica do volume deslocado.

Alíquotas (amostras 1 e 2)	Peso (g)	Volume Deslocado (ml = cm ³)	Densidade Relativa (g/cm ³)
1A	24,030	4	6,0
1B	9,855	1,5	6,6
1C	10,571	1,5	7,0
1D	12,420	2,25	5,5
1E	12,107	2	6,1
1F	4,964	0,75	6,6
2A	10,860	2	5,4
2B	7,361	1,4	5,3
2C	4,598	0,8	5,7
2D	7,978	1,5	5,3
2E	6,367	1,1	5,8
2F	3,362	0,6	5,6
2G	3,011	0,6	5,0
2H	2,596	0,5	5,2
2I	2,624	0,5	5,2

Os resultados obtidos revelaram que as alíquotas da Amostra 1 (1A a 1F) apresentam uma tendência a possuir densidades relativamente maiores em relação às alíquotas da Amostra 2 (2A a 2I) – Tabela 1 e Figura 2. Isto corrobora com a avaliação preliminar feita, na qual evidenciou-se uma apa-

rente diferença de densidade entre as amostras 1 e 2.

Por outro lado, os resultados obtidos com a técnica do **picnômetro** revelam que os valores de densidade das amostras estudadas oscilam entre 5,53 e 5,79 g/cm³ (Tabela 2).

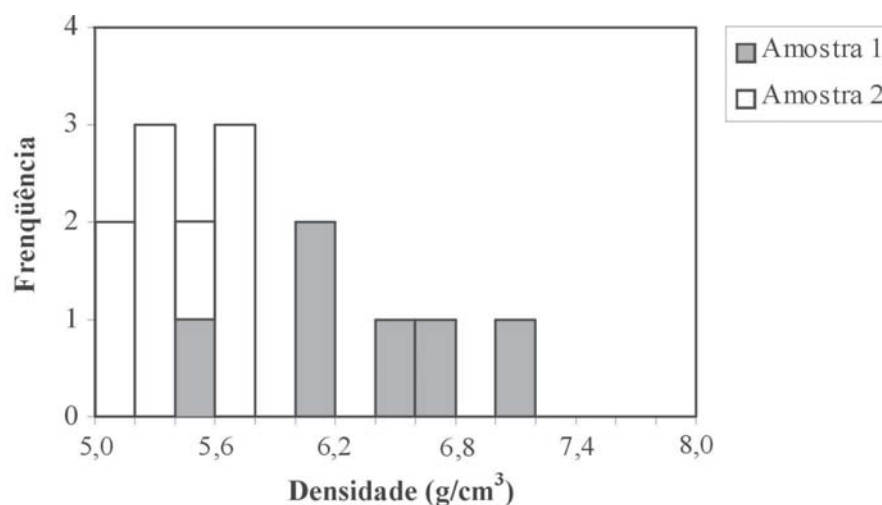
**Figura 2** – Histograma de frequência para os dados de densidade (técnica do volume deslocado).

Tabela 2 – Valores de densidade obtidos pela técnica do picnômetro.

Alíquotas (amostras 1 e 2)	P _p (g)	P _{p+m} (g)	P _{p+m+a} (g)	P _{p+a} (g)	Densidade Relativa (g/cm ³)
1A	34,808	56,344	104,919	87,194	5,65
1B	34,793	43,478	94,320	87,194	5,57
1C	34,790	44,207	94,953	87,194	5,68
1D	34,799	45,754	96,208	87,194	5,64
1E	34,785	45,895	96,346	87,194	5,67
1F	34,783	39,603	91,181	87,194	5,79
2A	34,782	44,596	95,260	87,194	5,61
2B	34,783	41,412	92,640	87,194	5,60
2C	34,782	39,050	90,717	87,194	5,73
2D	34,783	41,244	92,528	87,194	5,73
2E	34,783	40,237	91,662	87,194	5,53
2F	34,783	37,804	89,681	87,194	5,66
2G	34,783	37,419	89,365	87,194	5,67
2H	34,782	36,803	88,859	87,194	5,68
2I	34,782	37,183	89,177	87,194	5,74

P_p, P_{p_{tm}}, P_{p_{tmta}}, P_{p_{ta}}, ver texto.

Na Figura 3 observa-se que a Amostra 1 apresenta a maior parte das alíquotas (5) com valores de densidade no intervalo de 5,60 e 5,80 g/cm³ e apenas uma alíquota com densidade no intervalo entre 5,40 e 5,60 g/cm³. Quanto à Amostra 2, a mesma apresenta a maioria das alíquotas (8) também no intervalo entre 5,60 e 5,80 g/cm³ e uma única alíquota no intervalo entre 5,40

e 5,60 g/cm³. Portanto, ao contrário do que foi observado nas análises pela técnica do volume deslocado, os resultados obtidos utilizando-se o picnômetro não revelaram nenhuma variação significativa de densidade relativa entre as amostras 1 e 2. Todas as alíquotas destas amostras avaliadas possuem valores de densidade dentro dos mesmos intervalos de variação.

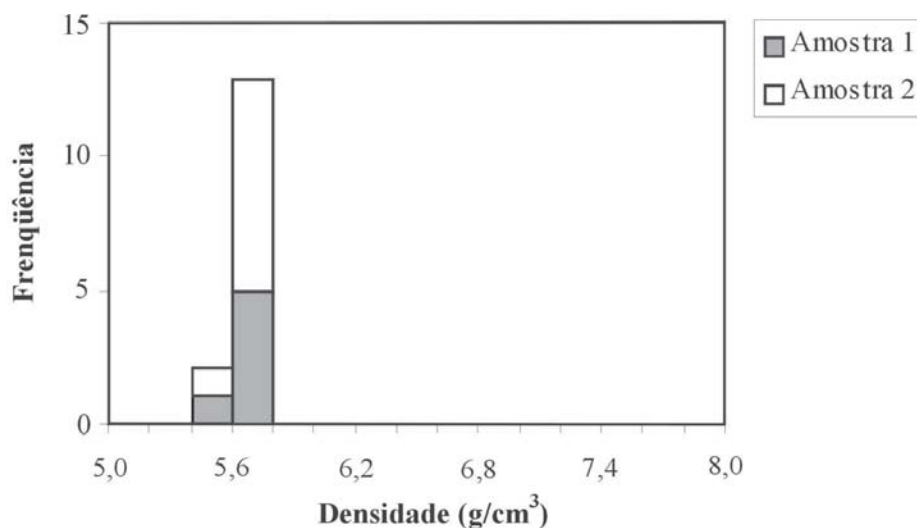


Figura 3 – Histograma de frequência para os dados de densidade (técnica do picnômetro).

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE Ta NA COLUMBITA-TANTALITA

Como primeiro passo para a determinação da concentração de Ta na columbita-

tantalita foi construído um diagrama mostrando a variação do teor de Ta na columbita-tantalita em função da sua densidade (Figura 4).

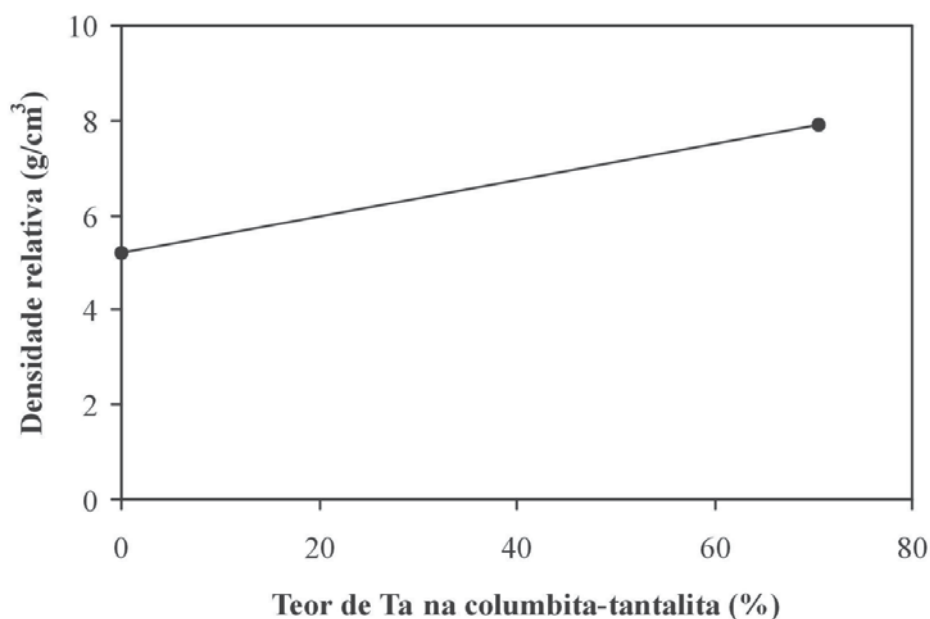


Figura 4 – Diagrama mostrando teor de Ta vs. densidade relativa para a columbita-tantalita. O teor de Ta foi calculado considerando-se as composições ideais da Tantalita $[(Fe,Mn)Ta_2O_6]$ e Columbita $[(Fe,Mn)Nb_2O_6]$.

Os pontos no diagrama da Figura 4 definem uma reta, para a qual foi obtida, através de regressão linear, sua equação, onde relaciona-se densidade (**d**) e teor de Ta (**Ta**) da seguinte forma:

$$Ta = \frac{(d - 5,2)}{0,038292} \quad \text{equação (3)}$$

Na equação (3) os valores calculados para **Ta** são em %, enquanto que os valores de **d** utilizados são em g/cm³.

Em uma comparação direta entre as técnicas utilizadas neste trabalho para a obtenção da densidade, destaca-se que também pelo fato de envolver unicamente obtenção de peso em balança analítica, a téc-

nica do picnômetro é considerada mais precisa em relação à técnica do volume deslocado. Esta última envolve, além da obtenção do peso em balança, a leitura do volume deslocado em proveta, sendo portanto passível de um maior acúmulo de erros.

Dessa forma, considerando-se a melhor precisão analítica da técnica do picnômetro, utilizou-se os dados de densidade obtidos por esta técnica para a determinação do teor de Ta nas amostras avaliadas.

A Tabela 3 apresenta os resultados do teor de Ta determinado para as densidades obtidas (picnômetro) para as várias alíquotas das amostras investigadas, usando-se a equação (3). Os resultados de Ta estão tanto na forma elementar (Ta) como na forma

de óxido (Ta_2O_5), formas nas quais comumente são apresentados tais resultados. Os valores na forma de óxido foram calculados através da equação (4) abaixo, a qual considera os pesos atômicos dos elementos químicos envolvidos nas formas elementar e de óxido:

$$Ta_2O_5 = \frac{(Ta \times 441,9)}{361,9} \quad \text{equação (4)}$$

Tabela 3 – Valores de densidade e teor de Ta determinados nas amostras de columbita-tantalita do pegmatito Ubaeira.

Alíquotas (amostras 1 e 2)	Densidade Relativa (g/cm ³)	Ta (%)	Ta ₂ O ₅ (%)
1A	5,65	11,75	14,35
1B	5,57	9,66	11,80
1C	5,68	12,54	15,31
1D	5,64	11,49	14,03
1E	5,67	12,27	14,99
1F	5,79	15,41	18,81
2A	5,61	10,71	13,07
2B	5,60	10,45	12,76
2C	5,73	13,84	16,90
2D	5,73	13,84	16,90
2E	5,53	8,62	10,52
2F	5,66	12,01	14,67
2G	5,67	12,27	14,99
2H	5,68	12,54	15,31
2I	5,74	14,10	17,22

Os resultados obtidos revelam que o teor de Ta nas várias alíquotas das amostras 1 e 2 varia entre 8,62 e 15,41 % de Ta, e entre 10,52 e 18,81 % de Ta_2O_5 (Tabela 3).

O resultado da análise química (equipamento portátil de Fluorescência de Raios-X) de uma amostra de columbita-tantalita do pegmatito Ubaeira, executado pela Mineração Ubaeira (empresa que lavra o pegmatito), revelou que este mineral-minério contém aproximadamente 39 % de Nb. Tal resultado indicaria que o teor de tântalo no mineral em questão poderia chegar a 21 % de Ta, considerando-se a composição química ideal da columbita-tantalita [(Fe,Mn)(Nb,Ta)₂O₆]. Salienta-se que a amostra utilizada nesta análise química não

está entre aquelas utilizadas neste trabalho, e portanto pode se tratar de uma amostra “mista”, composta por cristais apresentando diferentes densidades, e por conseguinte, variáveis teores de Ta.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Na Província Pegmatítica do Seridó já era conhecida a existência de tantalatos variados (Adusumilli 1978) e recentemente foram descobertos outros pouco comuns (Beurlen *et al.* 2003, Beurlen & Da Silva 2003), dentre os quais merece destaque a ixiolita [(Ta,Nb,Sn,Mn⁺²,Fe⁺²)O₂], wodginita [Mn⁺²(Sn,Ta)(Ta,Nb)₂O₈] e tapiolita [(Fe,Mn)(Ta,Nb)₂O₆], que são polimorfos da columbita-tantalita e possuem propriedades

físicas similares, como a densidade. Os valores de densidade apresentados por estes três polimorfos ($6,94\text{--}7,23\text{ g/cm}^3$, $7,19\text{--}7,36\text{ g/cm}^3$ e $8,17\text{ g/cm}^3$, respectivamente – Gaines *et al.* 1997) estão dentro, ou próximos, do intervalo de variação da densidade da columbita-tantalita ($5,2\text{--}7,9\text{ g/cm}^3$). Portanto tais polimorfos poderiam ser confundidos com a columbita-tantalita. Apesar da densidade da tapiolita ficar acima do limite superior do intervalo dos valores de densidade para a columbita-tantalita, mesmo assim esse mineral teria densidade similar à ferro-tantalita ($8,2\text{ g/cm}^3$) ou à mangano-tantalita ($8,1\text{ g/cm}^3$), e portanto poderiam também ser confundidas. Em todos os casos, os teores de Ta estimados pela densidade poderiam não refletir a composição da columbita-tantalita, mas sim, por analogia composicional, quantidades de Ta em outros de seus polimorfos. Uma forma para se contornar tal limitação, seria a utilização conjunta de técnicas que permitem uma boa caracterização mineral, como a difratometria de raios-x (Adusumilli 1978).

Neste trabalho, os valores de densidade obtidos ($5,53$ e $5,79\text{ g/cm}^3$, pela técnica do picnômetro) descartam a existência dos polimorfos acima nas amostras utilizadas, uma vez que todos os três possuem densidades acima dos valores encontrados.

Exemplos de outros minerais opacos que ocorrem nos corpos pegmatíticos da região em foco e que poderiam ser, pelo menos macroscopicamente, confundidos com a columbita-tantalita, seria a cassiterita (SnO_2) e o nióbio-rutilo $[(\text{Nb},\text{Ti})\text{O}_2]$, que tiveram a ocorrência relatada por Beurlen (1995), Da Silva *et al.* (1995) e Beurlen & Da Silva (2003). Isso porque esses dois minerais poderiam apresentar similaridades (e.g. cor e brilho) com a columbita-tantalita. Entretanto, a densidade do nióbio-rutilo ($4,25$ e $4,35\text{--}4,92\text{ g/cm}^3$ para rutilo e ilmeno-rutilo, respectivamente – Gaines *et al.* 1997) seria inferior àquela da columbita-tantalita. Não

seria o caso da cassiterita, que possui densidade ($6,8\text{--}7,0\text{ g/cm}^3$ – Gaines *et al.* 1997) dentro do intervalo de valores registrado para a columbita-tantalita. Nesse aspecto, a cassiterita poderia ser efetivamente confundida com a columbita-tantalita em uma descrição macroscópica.

Deve ser ressaltado ainda que na columbita-tantalita, além do Ta, Nb, Fe e Mn, podem ainda ocorrer outros metais em quantidades variáveis, como o Mg, Sn, W e U, que, a depender das mesmas, podem interferir na densidade relativa do mineral em apreço. Dessa forma, a presença significativa desses outros metais pode vir a dificultar a utilização do método da densidade para o fim exposto neste trabalho, uma vez que, neste caso, a variação da densidade não seria função única e exclusiva dos teores de Ta e Nb.

Entre as duas técnicas empregadas (volume deslocado e picnômetro) neste trabalho para a obtenção da densidade relativa, a técnica do picnômetro mostra ser mais precisa, sendo portanto melhor indicada para a determinação do teor de Ta na columbita-tantalita. Os valores de densidade obtidos pelo volume deslocado não apresentaram uma boa qualidade, quando comparados aos valores determinados pelo picnômetro.

Para uma melhor avaliação da validade da presente aplicação faz-se necessário a análise química das amostras utilizadas neste trabalho. Tais análises serviriam para se fazer uma verificação dos teores de Ta ora determinados.

A determinação do Ta na columbita-tantalita possui custo relativamente elevado e é um fator fundamental na avaliação econômica deste mineral-minério. A utilização da densidade relativa para se determinar o teor de Ta na columbita-tantalita demonstra ser um método alternativo para contornar os problemas relacionados ao custo e às dificuldades analíticas. Este método pode ser consi-

derado viável considerando-se sua praticidade e baixo custo, pois utiliza materiais analíticos de uso simples e baratos. Este método pode permitir a determinação do Ta no próprio garimpo, por exemplo, promovendo uma avaliação rápida do minério.

Um importante aspecto é que, através da densidade ter-se-ia uma boa indicação da variação dos teores de Ta em um mesmo corpo pegmatítico, evitando-se para isto a análise química de um número considerável de amostras. Com a análise química de apenas algumas amostras, e a determinação do Ta pelo método proposto em um número maior de amostras, seria possível ter um bom diagnóstico do minério. Isto é o que foi revelado pelos resultados deste trabalho, quando se mostra a existência de teores variáveis de Ta (de 8,62 a 15,41 % de Ta) no minério do pegmatito Ubaieira. Tal constatação justificou o uso de uma classificação diferenciada do minério do pegmatito em questão, com base no seu teor de Ta, visando proporcionar um melhor valor de mercado para o mesmo. Este fato pode ser extrapolado para outros garimpos da região, onde uma tal avaliação poderia torná-los mais rentáveis. Isto tornaria a exploração da columbita-tantalita na região mais racional, fazendo-se com que o minério de Ta em um mesmo garimpo possa ter preços diferenciadamente justos, ao contrário de um preço único, que pode vir a ser atribuído com base no mais baixo teor de Ta existente.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar os sinceros agradecimentos à Geóloga-M.Sc. e proprietária da Mineração Ubaieira, Maria Cláudia Pereira de Araújo, pelo acesso ao pegmatito, pelas amostras cedidas, assim como por disponibilizar a análise química apresentada neste trabalho. À Adriana Baggio pela revisão do texto. Ao Dr. Ricardo Sallet e um revisor anônimo pelas críticas e sugestões ao manuscrito.

REFERÊNCIAS

- Adusumilli M.S. 1978. Nióbio-tantalatos do Nordeste do Brasil: a série Columbita-Tantalita. *Journal de Mineralogia*, **7**: 195-225.
- Araújo M.N.C., Alves da Silva F.C., Jardim de Sá E.F. 2001. Pegmatite Emplacement in the Seridó Belt, Northeastern Brazil: Late Stage Kinematics of the Brasiliano Orogen. *Gond. Resear.*, **4** (1): 75-85.
- Beurlen H. 1995. The mineral resources of the Borborema Province in Northeastern Brazil and its sedimentary cover: a review. *Jour. South Am. Earth Sci.*, **8** (3-4): 365-376.
- Beurlen H. & Da Silva M.R.R. 2003. Química Mineral de Tantalatos da Província Pegmatítica da Borborema. In: ABC, Reunião Ordinária da Academia Brasileira de Ciências, 13, *Resumos*.
- Beurlen H., Soares D. R., Borges L. E. P., Villaroel H. S., Da Silva M. R. R. 2003. Análise de mecanismos de substituição em tantalato exótico: provável titanixiolita na Província Pegmatítica da Borborema. *Revista de Geologia*, **16** (2): 7-18.
- Cunningham L.D. 1985. "Tantalum". U.S. Bureau of Mines Mineral Facts and Problems, pp.: 811-822.
- Dana J.D. & Hurlbut C.S.Jr. 1976. *Manual de Mineralogia*. Vol. 1, 3^{ed}. Livros Técnicos e Científicos Ed. S.A., Rio de Janeiro, 354 pp.
- Da Silva M.R.R. & Dantas J.R.A. 1984. A Província Pegmatítica da Borborema – Seridó nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. In: A Montalverne (ed.) *Principais Depósitos Minerais do Nordeste Oriental*. Série Geologia Econômica, 4, DNPM, pp.: 235-304.
- Da Silva M.R.R., Höll R., Beurlen H. 1995. The Borborema Pegmatitic Province: Geological And Geochemical Characteristics. *Jour. South Am. Earth Sci.*, **8** (3-4): 355-364.

- Ebert H. 1970. The precambrian geology of the Borborema Belt (states of Paraíba and Rio Grande do Norte, northeastern Brazil) and the origin of its mineral provinces. *Geologische Rundschau*, **59**: 1299-1326.
- Foucault A. & Raoult J.-F. 1995. *Dictionnaire de Géologie*. 4^{ed}. Masson, Paris, 324 pp.
- Gaines R. V., Skinner H. C. W., Foord E. E., Rosenzweig A. 1997. *Dana's New Mineralogy*. 8^{ed}. John Wiley & Sons, New York, 1.819 pp.
- Jesus E. A. 2000. *Avaliação Geoeconômica de uma área a nordeste de Currais Novos-RN*. Relatório de Graduação (nº 171), Departamento de Geologia, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 60 p. + anexos.
- Johnston Jr. W. & Vasconcellos M. 1945. Scheelite in Northeastern Brazil. *Econ. Geol.*, **40**: 34-50.
- Kesler S.E. 1994. *Mineral Resources, Economics and the Environment*. MacMillan College Publishing Company, New York, 391 pp.
- McMurry J., Long L.E., Sial A.N. 1987. Two-stage evolution of a texturally homogeneous granite: REE and isotopic evidence from the Dona Inês Pluton, Northeastern Brazil. In: SBG, Internat. Symp. on Granites and Associated Mineralizations, 1, *Extend Abstracts*, p. 155-158.
- Rollinson H. 1996. *Using Geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman, Singapore, 352 pp.
- Van Schmus W.R., Brito Neves B.B., Williams I.S., Hackspacher P.C., Fetter A.H., Dantas E.L., Babinsky M. 2003. The Serido Group of NE Brasil: a late Neoproterozoic pre to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from shrimp U-Pb detrital zircon ages and Sm-Nd crustal residence (T_{dm} ages). *Precambrian Research*, **127**: 287-327.