

Caracterização de lamas contendo urânio como subsídio para ações futuras de mitigação

Characterization of sludge containing uranium as support for mitigation actions

Abda Florência da Silva Gomes

Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais.
abdafsg@yahoo.com

Ana Cláudia Queiroz Ladeira

Prof., Dra., Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).
ana.ladeira@cdtn.br

Resumo

A drenagem ácida na mina de urânio de Caldas (MG) ocorre há mais de 20 anos, apresenta pH próximo de 3,0 e contém elementos metálicos e não-metálicos. Para o tratamento do descarte desse efluente, utiliza-se de cal para elevação do pH e precipitação dos contaminantes, gerando uma lama que é disposta na cava da mina, inundada de água ácida. O presente estudo consiste na caracterização de três amostras (Lama Antiga, Lama da Cava e Lama Fresca), utilizando análise térmica TGA/DTA, microsonda eletrônica e classificação de acordo com as normas NBR 10005 e NBR 10006. A caracterização enfocou a determinação das fases morfológicas e a composição elementar, para correlacioná-las com a capacidade de migração dos contaminantes. A etringita, a calcita e o gesso foram as fases identificadas como majoritárias. As lamas foram classificadas como não perigosas, mas não inertes. Estudos sobre a biodisponibilidade do urânio mostrou que este é facilmente solubilizado, pois a maior parte desse metal se encontra na fração lábil. A caracterização radiológica mostrou que todas as amostras apresentam valores abaixo do limite de isenção, de acordo com a Posição Regulatória PR-3.01/001 da Norma CNEN-NN-3.01.

Palavras-chave: Caracterização de lamas, urânio, drenagem ácida de minas.

Abstract

Acid mine drainage in the uranium mine at the Caldas Municipality (MG) has been occurring for over 20 years. This drainage has a pH of around 3.0 and contains metals and non-metals. The current acid water treatment uses lime to increase the pH and precipitates the contaminants before discharging the water into the environment. This procedure generates a sludge that is currently disposed into the mine pit which is flooded with acidic water. The present study aims at the characterization of 3 different samples, identified as Lama Antiga (old sludge), Lama da Cava (pit sludge) and Lama Fresca (fresh sludge), by using the TGA/DTA, electron microprobe, standard classification procedures NBR 10005 and NBR 10006. The characterization focused on determining the morphological phases and elemental composition in order to correlate them with the migration of contaminants. Ettringite, calcite and gypsum were identified as the majority phases. The sludges were classified as non-hazardous, but not inert. Studies on the uranium bioavailability showed that it is easily dissolved as most of this metal is present in the labile fraction. The radiological characterization showed that all samples are below the clearance value, according to PR-3.01/001.

Keywords: Characterization of sludge, uranium, acid mine drainage.

1. Introdução

Devido à sua dinâmica e persistência, a drenagem ácida de mina é considerada um dos problemas mais sérios da indústria de mineração. Esse fenômeno ocorre quando a pirita e outros minerais sulfetados se oxidam por exposição ao oxigênio e água, produzindo ácido sulfúrico e metais dissolvidos. O ácido sulfúrico produzido pode promover a solubilização dos metais presentes nos solos, acidificar cursos d'água e contaminar aquíferos. As principais fontes de drenagens ácidas são as minas a céu aberto ou subterrâneas, bacia de rejeitos, pilha do estéril e de estocagem do minério de baixo teor. O problema de drenagem ácida de mina tem-se destacado na região de Caldas, Minas Gerais, em uma mina desativada de urânio pertencente às Indústrias Nucleares do Brasil, INB. Na época de operação da mineração, nas décadas de 70 a 90, foram geradas grandes quantidades de rejeitos constituídos de minério de baixo teor de urânio (< 200ppm) e de estéril. Esses materiais foram dispostos em extensas áreas próximas à região mineradora e se tornaram fonte de drenagem ácida, que contém radionuclídeos (urânio, tório e rádio)

e elementos estáveis (Mn, Zn, Fe, F) em níveis de concentração acima dos valores permitidos pela legislação para o lançamento direto no ambiente (Nascimento et al., 2004, Ladeira e Gonçalves, 2007). A geração da drenagem ácida alcança o volume de 250 m³/h de água com pH entre 2,5 e 3,0. O tratamento realizado, para o descarte dessa água, para o meio ambiente, consiste na utilização de cal para a precipitação de vários metais, entre eles o urânio e manganês. Esse tratamento gera um precipitado, lama alcalina, que é disposto na cava da mina há mais de 20 anos e esta se encontra inundada de água ácida. O problema é agravado uma vez que a lama alcalina permanece constantemente em contato com essa solução ácida. A disposição desse precipitado, contendo urânio e outros metais tóxicos, em um lugar que não pode ser utilizado como armazenamento final e não atendendo as especificações de uma bacia de rejeitos, enquadra-se no enfoque de análise de riscos. Esse material sofre intemperismo, podendo dissolver-se com alta possibilidade de contaminação do meio ambiente. Estima-se que, anualmente,

são depositadas, na cava da mina, além de outros precipitados metálicos, cerca de 20 a 30 toneladas de U₃O₈. Esse procedimento tem causado sobrecarga de poluentes químicos e radioativos na cava, que não foi projetada para receber esse volume de lama e não possui os requisitos de construção necessários para armazenamento final (Nascimento et al., 2004). A concentração de urânio nas lamas, entre 0,24 e 0,64%, é considerada alta, uma vez que o minério extraído, na Bahia, atualmente apresenta, aproximadamente, 0,29% de urânio. Esse estudo consiste na caracterização de três amostras diferentes de lama coletadas em diferentes locais de disposição. A caracterização será útil para avaliar se o contato da lama com a água ácida, que atualmente se encontra na cava da mina, contribui para sua instabilidade química, tendo em vista a sua possível dissolução no meio ambiente e a sua possível contaminação. A caracterização é a primeira etapa de um projeto amplo, no qual os dados gerados servirão de base para a tomada de decisões ambientalmente apropriadas para o descomissionamento da mina de Caldas.

2. Materiais e métodos

Amostras: As lamas foram coletadas em tres locais diferentes. Em cada local, obteve-se uma amostra composta de 6 pontos distintos. Estas foram identificadas conforme o tempo e o local de disposição: i) Lama Antiga: disposta há mais de 10 anos em um sítio desativado; ii) Lama da Cava: disposta a menos de 10 anos na cava da mina após a saturação do sítio desativado, iii) Lama Fresca: recolhida na saída do tanque de precipitação do atual sistema de tratamento da água ácida.

Determinação de Radionuclídeos: As análises de rádio 226 e 228 e de chumbo 210 foram realizadas por espectrometria gama e contagem alfa e beta total, nos laboratórios de Poços de Caldas, da INB.

Microssonda Eletrônica: Para identificar a composição elementar das fases cristalinas utilizou-se microscópio eletrônico de varredura acoplado ao EDS, marca JEOL modelo JXA8900RL WD/ED com imageamento de elétrons retroespalhados e secundários, sob as seguintes condições: tensão de aceleração de 15 a 20 kV e corrente

de feixe de elétrons de 12 nA. Foram analisadas as amostras na forma original e após solubilização de fases majoritárias, em água, para melhor identificação das fases minoritárias às quais, possivelmente, o urânio estava associado. As amostras foram colocadas em uma lâmina e metalizadas com carbono para se obter uma superfície lisa e polida. O software do sistema gera os espectros relativos ao número de contagens de fótons emitidos em função da energia, identificando os elementos químicos presentes na amostra.

Caracterização térmica (TGA/DTA): Essa caracterização foi conduzida utilizando-se o instrumento SDT V3 OF modelo 2960, sob as seguintes condições: 20°C/min até 1300°C, ar sintético – 100 mL/min. Essa técnica permitiu avaliar a decomposição, a desidratação e a variação de massa das amostras em função da temperatura e correlacioná-las com as fases cristalinas das lamas.

Estabilidade química: O procedimento descrito na norma NBR 10005

(ABNT, 2004), para classificação da amostra em perigosa ou não perigosa, consiste em agitar a amostra em uma solução de ácido acético e, após agitação, a suspensão é filtrada. No filtrado, determina-se o teor de diversos elementos e comparando-os com os valores da norma NBR 10004, anexo F (ABNT, 2004). No presente trabalho, utilizou-se uma solução de H₂SO₄ como lixiviante. Esse procedimento modificado foi adotado porque, atualmente, a lama permanece em contato com a solução ácida gerada na cava da mina. Desta forma, testou-se o potencial lixiviador de uma solução similar à do local de disposição.

Ensaio de biodisponibilidade: Esses ensaios consistiram no contato sequencial das amostras com diferentes soluções sendo tais ensaios realizado em dois estágios: A) Determinação dos contaminantes solúveis em água – 1,0g de amostra para 800mL de água destilada; B) Determinação dos íons trocáveis, carbonatos e óxidos de cálcio – tampão NaOAc 1mol.L⁻¹/HOAc em pH 5,0.

3. Resultados e discussão

Caracterização

A análise térmica descreve o comportamento térmico da amostra, ou seja, se ela sofre decomposição, desidratação e variação de energia e massa quando aquecida. Desta forma as amostras são identificadas de acordo com seu comportamento mediante a variação de temperatura. A Figura 1 apresenta os diagramas TGA-DTA para as amostras em estudo. As Lamas Antiga e Fresca apresentaram um comportamento se-

melhante, sendo identificadas quatro transições características de perda de água da fase cristalina referente à etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26 \text{H}_2\text{O}$). Tais transições ocorreram nos intervalos de temperatura entre 25° e 175°C, entre 175° e 450°, 450° e 775°C e, ainda, entre 775° e 1300°C. Um estudo realizado por Perkins e Palmer (1998) identificou quatro intervalos de DTA-TGA característicos para uma amostra de etringi-

ta pura. Segundo esses autores, em uma temperatura entre 40° e 180°C, ocorrem um pico de desidratação equivalente a 22 moléculas de água por mol de etringita, entre 180° e 280°C ocorre uma nova desidratação referente a 4 moléculas de água. De 280° a 600°C, assim como de 600° a 900°C, ocorre a perda de 2,5 moléculas de água, porém referentes à estrutura interna do cristal. Comparando esse estudo com os resultados obtidos

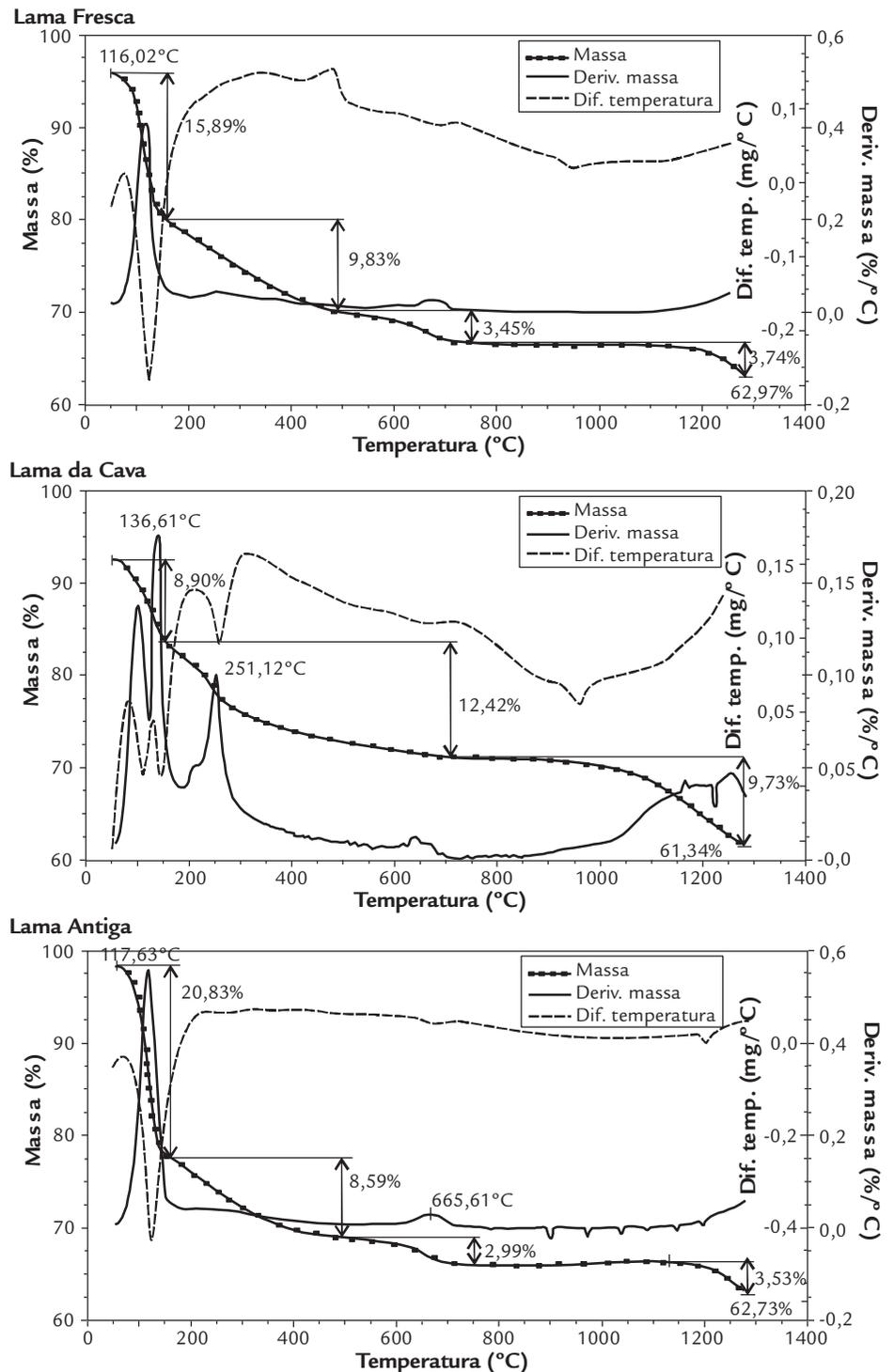


Figura 1
Diagrama TGA-DTA obtido para as amostras das Lamas Fresca, da Cava e Antiga.

para a Lama Fresca e Antiga, foi possível observar intervalos de temperatura próxima das quatro transições características da etringita estudada por Perkins e Palmer (1998). Dessa forma, o material que está sofrendo a desidratação certamente é a Etringita. As pequenas diferenças observadas devem-se ao fato de as lamas serem compostas de outras fases minerais e não somente etringita. Identificou-se, também, um pico, em um intervalo de temperatura entre 600° e 700°C, nas três lamas (Figura 1). Esses picos referem-se à decomposição da fase cristalina calcita (CaCO_3) e corresponde à liberação de gás carbônico. A perda de massa total, determinada pelo diagrama TGA-DTA, para as lamas Fresca e Antiga, foi, em média, 34%, enquanto a porcentagem teórica em massa das moléculas de água da etringita é 37,32%. Essa diferença, inferior a 5%, refere-se à presença de outras fases nas amostras, entre elas a calcita.

A análise térmica da Lama da Cava apresentada na Figura 1 mostra dois intervalos de temperatura característicos de perda de água do gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sendo eles entre 25° e 175°C, 200° e 400°C, que resultou numa perda total de massa de 31,0%. A análise de perda ao fogo representou 30,5% da Lama da Cava, conforme estudos anteriores, indicando conformidade entre as diferentes técnicas utilizadas como, por exemplo, a difração de raios X (Gomes et al., 2008, Gomes, 2009). Segundo Strydom e Potgieter (1999), picos endotérmicos, em temperaturas entre 160° e 200°C, são característicos da desidratação do gipso natural. A Lama da Cava também apresentou picos endotérmicos

nas temperaturas de 136,6° e 251°C. A diferença de temperatura, entre os picos citados por Strydom e Potgieter e os picos determinados experimentalmente na Lama da Cava, justifica-se pelo fato de a amostra em estudo não ser pura.

A técnica de microsonda eletrônica acoplada ao EDS foi utilizada para verificar a composição elementar das amostras, auxiliar na identificação das fases cristalinas e possíveis associações do urânio a determinados grupos químicos, como carbonatos, sulfatos ou, até mesmo, detectar o diuranato de cálcio. A utilização dessa técnica foi necessária, pois, através da difração de raios X (Gomes et al., 2008; Gomes, 2009; Santos, 2010), não foi possível determinar em qual fase cristalina o urânio estava presente nas três amostras devido a dois fatores: limite de detecção do aparelho superior a 5% e muito acima do teor de urânio (0,24 a 0,64%) e grande quantidade de material amorfo.

De forma geral, as análises por microsonda eletrônica mostraram a presença de cálcio, lantânio, cério, terras-raras, alumínio, manganês, ferro, além de carbono e oxigênio. Estes dois últimos são indicativos da presença de óxidos e carbonatos. Os elementos minoritários detectados foram o silício, zinco, enxofre e, também, traços de magnésio e sódio. É possível a presença de urânio associado ao ferro devido à alta luminosidade detectada pelo aparelho em todas as amostras, porém o teor não foi suficiente para detecção. A Figura 2 apresenta a imagem obtida por microsonda eletrônica para a Lama da Cava após lavagem. Os pontos 1, 2 e 3, mostrados na Figura 2, compõem-se de Ca, Al, carbono e de

Mn. Os constituintes minoritários são silício, enxofre, terras-raras, Zn e Mg. A lavagem com água destilada da Lama da Cava promoveu a remoção de grande parte do gesso, com isso esperava-se uma maior identificação dos elementos minoritários, como o U. Entretanto tal fato não ocorreu, pois acredita-se que o urânio se encontra finamente disseminado na amostra.

As imagens de microsonda eletrônica das três lamas, na forma original, e, também, da Lama Fresca, na forma lavada, não foram apresentadas devido à semelhança de resultados entre as amostras. A Figura 3 apresenta a Lama Antiga, após lavagem, analisada com um aumento de 400x. Os elementos determinados foram, basicamente, os mesmos encontrados nas análises anteriores. Entretanto, nessa amostra, foi possível detectar a presença de urânio como elemento minoritário, na região indicada pelo ponto 1.

A Figura 4 mostra o pico referente ao urânio. Na área analisada, foi, também, detectada uma quantidade maior de ferro, indicando uma possível associação do ferro ao urânio. Posteriormente, Gomes (2009) demonstrou, através de ensaios de extração sequencial, que essa associação ocorre, pois 40,6% do urânio da Lama Antiga está presente na fase associada à oxí-hidróxidos de ferro e manganês amorfos. De modo geral, foi difícil determinar o urânio por essa técnica, em parte devido à alta porosidade do material que pode agregar no interior dos poros mais de uma fase e, também, pelo fato de o urânio estar finamente disseminado nas amostras, tendo como agravante o seu baixo teor.

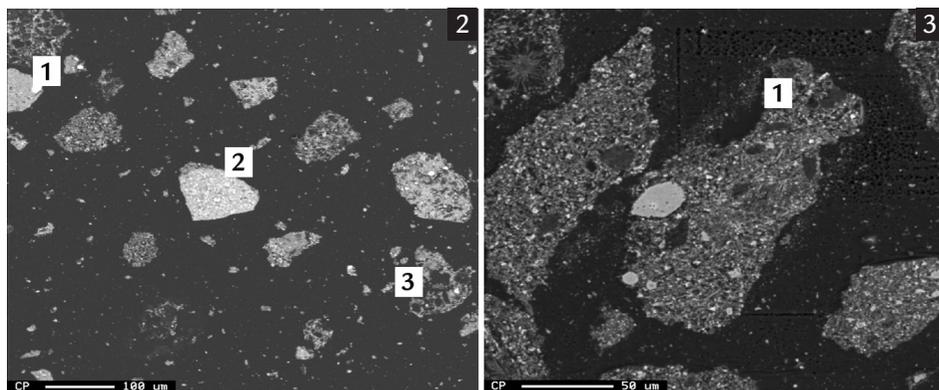


Figura 2
Microscopia eletrônica da Lama da Cava após lavagem com água deionizada, com aumento de 150x.

Figura 3
Microscopia eletrônica da Lama Antiga após lavagem com água deionizada, com aumento de 400x.

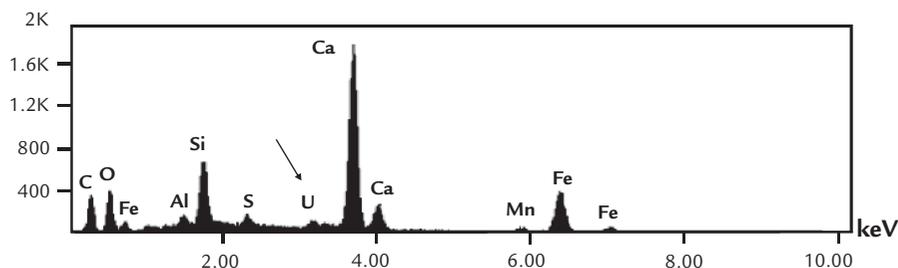
Estabilidade química

A Tabela 1 apresenta os resultados de análises do ensaio de lixiviação utilizando uma solução de ácido sulfúrico

(pH ~ 2,7) em substituição à solução de ácido acético. A utilização da solução de ácido sulfúrico, em detrimento do ácido

acético, é no intuito de simular a condição natural de disposição da lama da Cava. No entanto, de forma semelhante

Figura 4
Espectrograma obtido por
microsonda eletrônica da Lama Antiga
após lavagem com água deionizada,
com aumento de 400x.



aos resultados com ácido acético (Gomes et al., 2008, Gomes, 2009), os teores em solução encontrados para os principais elementos considerados perigosos e presentes nas lamas não extrapolaram os limites estabelecidos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004).

Sendo assim, com base nos limites propostos pela norma NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos foram classificados como não-perigosos. Entretanto, um resíduo, quando classificado como não perigoso, deve ser classificado, também, em inerte ou não-inertes. Conforme os ensaios de classificação, realizados segundo a norma NBR 10005 (ABNT, 2004), as lamas foram classificadas como não-inertes, Classe IIA. Tal classificação deve-se ao fato de

os teores de sulfato, entre 1,60 a 1,87 mg.L⁻¹ e fluoreto, entre 4,3 a 7,0 mg.L⁻¹, estarem acima do limite permitido pela norma, sendo este de 250 mg.L⁻¹, para sulfato, e 1,5 mg.L⁻¹, para fluoreto. De acordo com essa classificação, as lamas deveriam ser dispostas em local apropriado, pois tal fato implica a instabilidade química das mesmas (Gomes et al., 2008, Gomes, 2009).

Os ensaios de biodisponibilidade permitiram determinar que 20% do urânio presente na amostra da Cava é facilmente solubilizado em água (estágio A). As demais amostras não apresentaram dissolução do urânio em água. Entretanto, no estágio B, que consistiu no contato com solução de acetato de sódio e ácido acético, a solubilização foi em torno de

60% a 100%, o que indica que o urânio de todas as amostras avaliadas aparece na fração lábil. A fração lábil, que compreende a fração solúvel em água juntamente com os íons trocáveis, e a fração associada a carbonatos e/ou óxidos são consideradas facilmente móveis (Gavrilescu et al., 2009). A amostra da Cava se mostrou a mais instável, o que sugere que a atual forma de disposição da lama deve ser avaliada criteriosamente, já que existe um indicativo da possível migração de contaminantes em decorrência do contato com a água ácida. Para determinar uma possível ação futura de descomissionamento da mina, esse grupo de pesquisa estuda a recuperação do urânio da lama por lixiviação alcalina (Santos, 2010) e lixiviação ácida.

Tabela 1

Resultados obtidos na lixiviação
com ácido sulfúrico.

Elementos analisados	Limite máximo (mg.L ⁻¹)	Lama Fresca (mg.L ⁻¹)	Lama da Cava (mg.L ⁻¹)	Lama Antiga (mg.L ⁻¹)
As	1,0	< 0,09*	< 0,09*	< 0,09*
Ba	70,0	< 10	< 10	< 10
Cd	0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Pb	1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cr	5,0	< 0,20	< 0,20	< 0,20
F ⁻	150,0	4,10	5,60	4,70
Hg	0,1	< 0,10*	< 0,10*	< 0,10*
Ag	5,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Se	1,0	< 0,70*	< 0,70*	< 0,70*
Cu	**	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fe	**	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Al	**	3,60	2,35	3,13
Zn	**	16,0	8,0	8,0
Mn	**	0,054	< 0,01	< 0,01
Ca	**	1.850	590	600
SO ₄ ⁻²	**	1.000	1.000	1.000

* Valores expressos em µg.L⁻¹.

** Valores não estabelecidos na norma NBR 10004 (ABNT, 2004) ANEXO F.

Determinação de radionuclídeos

A Tabela 2 apresenta os resultados da atividade específica dos radionuclídeos ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra e a contagem alfa e beta total para as amostras em estudo. Apesar de todas as amostras apresentarem valores abaixo do limite de isenção, de acordo com a Posição regulatória PR-3.01/001 da Norma CNEN -NN-

3.01 que é de 10.000 Bq.kg⁻¹ para ²²⁶Ra e ²²⁸Ra e 1.000 Bq.kg⁻¹ para o ²¹⁰Pb, a CNEN estabelece que, no caso de grandes quantidades de material envolvendo substâncias radioativas naturais ou tecnologicamente alteradas, os valores para dispensa devem ser estabelecidos caso a caso. Pela PR-3.01/001, entende-

se por grandes quantidades de material: i) materiais radioativos em quantidades superiores a 1 tonelada; ii) materiais advindos de operações de desmonte ou descomissionamento de instalações nucleares e radiativas; iii) áreas utilizadas como depósito de estéréis ou de rejeitos de mineração. Portanto acredita-se que

os materiais em estudo se enquadram dentro item iii e devem ser avaliados de forma específica. Ainda podemos dizer que o teor de ^{226}Ra se encontra dentro da concentração média mundial no solo que varia de 17 a 60Bq.kg^{-1} (média de 35Bq.kg^{-1}) (UNSCEAR, 2000). As amostras apresentaram teores de ^{228}Ra superiores aos de ^{226}Ra e, conseqüentemente, con-

tagem beta superior a contagem alfa, isto porque os solos brasileiros, em geral, apresentam teores de tório superiores aos de urânio (Pérez, 1997). O ^{226}Ra é o quinto elemento da série de decaimento do ^{238}U , tem meia-vida de 1600 anos e decai por emissão alfa. O ^{228}Ra é o segundo elemento da série de decaimento do ^{232}Th , tem meia-vida de 5,75 anos e

decai por emissão beta.

As Lamas Antigas e da Cava apresentaram contagem alfa e beta e concentração de radionuclídeos superior à Lama Fresca, em parte devido ao maior teor de urânio que foi 0,28% para a Lama Fresca, 0,64% para a Lama Intermediária e 0,58% para a Lama Antiga (Gomes, 2009).

Determinação	Lama Fresca (Bq.kg ⁻¹)	Lama da Cava (Bq.kg ⁻¹)	Lama Antiga (Bq.kg ⁻¹)
Alfa (total)	29.21 ± 4.76	70.07 ± 10.41	99.507 ± 14.63
Beta (total)	30.42 ± 3.00	69.55 ± 6.66	80.529 ± 7.69
^{210}Pb	< 80	< 80	395 ± 120
^{226}Ra	< 20	40 ± 6	350 ± 31
^{228}Ra	50 ± 10	290 ± 14	1.137 ± 55

Tabela 2

Radionuclídeos determinados por Espectrometria Gama e Contagem Alfa e Beta total nas lamas.

4. Conclusão

A técnica TGA/DTA permitiu identificar as fases cristalinas de etringita, calcita e gipso predominantes nas amostras. A microsonda eletrônica sugeriu a associação do urânio ao ferro e permitiu identificar constituintes elementares nas amostras, sendo eles o urânio, terras-raras, ferro, manganês, zinco, cálcio e sulfato. As lamas são consideradas não perigosas, mas devido ao fato de apresen-

tarem altos teores de sulfato e fluoreto, em relação àqueles estabelecidos por norma, tais lamas foram consideradas não-inertes. Esse fato indica a necessidade de serem dispostas em local apropriado. O urânio apareceu, em todas as amostras, na fração lábil, o que potencializa a migração de contaminantes e, conseqüentemente, a contaminação do meio ambiente torna-se mais provável. Este é um fato

bastante relevante, pois mostra a instabilidade química das lamas, principalmente quando em contato com soluções ácidas. Sendo assim, este é um indicativo de que as lamas em estudo não devem permanecer no local atual, ou seja, na cava da mina. Esta é uma avaliação importante que dará subsídio para o processo de descomissionamento da Mina de Caldas, que está em fase de planejamento.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro através

dos projetos INCT – Água, Recursos Minerais e Biodiversidade e PPM (Proje-

to Pesquisador Mineiro).

6. Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004/10005/10006. Rio de Janeiro, 2004.
- GAVRILESCU, M., PAVEL, L.V., CRETESCU, I. Characterization and remediation of soils contaminated with uranium. *Journal of Hazardous Material*, v. 163, p. 475-510, 2009.
- GOMES, A. F. S. *Avaliação do potencial poluidor de lamas radioativas como subsídio para ações futuras de mitigação*. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), 2009. (Dissertação de Mestrado).
- GOMES, A. F. S., VINHAL, A. P., LADEIRA, A. C. Q. *Estimation of Potential Pollution of Uranium Sludge from Acid Treatment*. In: 10th International Mine Water Association Congress, 2008, Karlovy Vary. Mine Water and the Environment Proceedings. Ostrava: Nada Rapantova, v. único. p. 193-196, 2008.
- LADEIRA A. C. Q., GONÇALVES C. R., Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. *J. Hazard. Mater.* 148, p. 499-504, 2007.
- NASCIMENTO, M. R. L. *Remoção de urânio de águas ácidas de mina por resina de troca iônica*. São Paulo: Universidade de São Carlos, 1998. (Dissertação de Mestrado).
- NASCIMENTO, M. R. L., FATIBELLO-FILHO, O., TEIXEIRA, L. A. Recovery of uranium from acid mine drainage waters by ion exchange. *Mineral Processing & Extrative Metall. Rev.* n. 25, p. 129-142, 2004.
- PÉREZ, D. V., SALDANHA, M. F. C., MENEGUELLI, N., MOREIRA, J. C., VAITSMAN, D. S. *Geoquímica de alguns solos brasileiros*. n. 4, p.1-14, 1997.

- PERKINS, R. B., PALMER, C. D. Solubility of ettringite ($\text{Ca}_6[\text{Al}(\text{OH})_6]_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}$) at 5-75°C. *Cosmochimica Acta*, v. 63, n°. 13/14, p. 1969-1980, 1998
- POSIÇÃO REGULATÓRIA 3.01/001 Critérios de exclusão, isenção e dispensa da aplicação de requisitos de proteção radiológica, Rev. 001 de nov. 2005; referente aos requisitos da Norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica” expressos nas subseções 1.2.5, 5.3.6 e 5.3.7.
- SANTOS, E.A. *Recuperação de urânio de rejeito de mina por meio de lixiviação alcalina*. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), 2010. (Dissertação de Mestrado).
- STRYDOM, C. A., POTGIETER, J. H. An investigation into the correlation between different surface area determination techniques applied to various limestone-related compounds. *Cement and Concrete Research*, v. 26, p. 1613-1617, 1999.
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION. Volume I: SOURCES. Disponível: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html. Visualizado em 24 de agosto de 2009.

Artigo recebido em 29 de julho de 2010. Aprovado em 17 de maio de 2011.