

Estudo sobre o radônio em minas subterrâneas brasileiras

SANTOS, T. O.^{1,2,3*}, ROCHA, Z.³, VASCONCELOS, V.³, CRUZ, P.⁴, GOUVEA, V. A.⁴, SIQUEIRA, J. B.⁴ e OLIVEIRA, A. H.¹

¹ Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

² Departamento de Anatomia e Imagem, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

³ Serviço de Meio Ambiente, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, Brasil.

⁴ Coordenação de Matérias Primas e Minerais, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo

Todo processamento técnico de minerais resulta na liberação de radionuclídeos de meia-vida longa e curta, principalmente de radônio e sua progênie. Assim, é importante monitorar esse gás e seus produtos em minas subterrâneas a fim de avaliar o risco radiológico para os trabalhadores ocupacionalmente expostos. Sendo assim, medidas da concentração de radônio e da sua progênie, cálculo do fator de equilíbrio e estimativa de dose foram realizadas para 6 minas subterrâneas do Brasil. A concentração de radônio e da sua progênie foram determinadas utilizando os monitores contínuos AlphaGUARD e DOSEman Pro, respectivamente. O estado de equilíbrio entre o radônio e sua progênie foi avaliado. Baseado nestes dados, estimou-se a dose efetiva anual para os mineiros de acordo com a metodologia recomendada pela UNSCEAR, 2000. A Concentração de Radônio variou de 113 a 4964 Bq.m⁻³ e a Concentração Equivalente de Equilíbrio se encontra na faixa de 76 a 1174 Bq.m⁻³. O fator de equilíbrio médio calculado, por sua vez, para as 6 minas foi de 0,4 (0,2 – 0,7). Com isso, os valores de dose efetiva para os trabalhadores das minas medeiam o seguinte intervalo: 1 a 21 mSv.a⁻¹, com valor médio de 9 mSv.a⁻¹.

Palavras chave: Radônio, Fator de Equilíbrio e Dose

Abstract

All technical processing of ore release long and short half-life radionuclides, mainly radon and its progeny. It is important monitoring these gas and its products in underground mines in order to assess the radiological hazards of the exposed occupational workers. To address this concern, radon and its progeny concentration measurement, equilibrium factor calculation and dose estimative were performed for 5 underground mines of Brazil. Radon and its progeny concentration were determined by using continuous monitors AlphaGUARD and DOSEman Pro, respectively. The equilibrium state between radon and its progeny was assessed. Based on these data, we estimated the annual effective dose for miners according to UNSCEAR 2000 methodology. Then, Radon Concentration ranged from 113 to 4964 Bq.m⁻³ and Equilibrium Equivalent Concentration varied from 76 to 1174 Bq.m⁻³. The average of the equilibrium factor for 5 mines was 0,4 (0,2 – 0,7). The computed effective dose for workers ranged from 1 to 21 mSv.a⁻¹ (mean 9 mSv.a⁻¹).

Keywords: Radon, Equilibrium Factor and Dose

1. INTRODUÇÃO

Os radionuclídeos de ocorrência natural, urânio e tório, estão presentes em concentrações variadas nos materiais geológicos, especialmente em rochas e solos. Sendo assim, todo processamento técnico de minerais resulta na liberação de radionuclídeos de meia-vida longa e curta provenientes das series naturais desses

radioelementos (Othman *et al*, 1992). A principal fonte de exposição à radiação natural em minas é decorrente do radônio e sua progênie (Baldik *et al*, 2006).

O radônio é produzido pelo decaimento do rádio presente no corpo mineral e por recuo emana da matriz sólida dos materiais para os interstícios entre grãos ou para os planos de fraturas das rochas (Santos, 2008). Durante a abertura de minas subterrâneas, o radônio é

transportado das rochas para o interior das galerias através da circulação de ar e de águas. A importância de cada processo de transferência relaciona-se com as fraturas tectônicas e geológicas da formação e do comportamento hidrogeológico do aquífero nas operações de mineração (ICRP, 1986).

O radônio, depois de exalado, migra ao longo das correntes de ventilação enquanto forma seus produtos de decaimento de meia-vida curta: Po, Pb e Bi. A dose correspondente ao radônio é atribuída à sua progênie que quando inalada deposita-se no pulmão, especialmente no trato respiratório superior, e irradia o tecido pulmonar ao decair. Estudos epidemiológicos revelam uma forte correlação entre câncer de pulmão e exposição ao radônio. Assim, a Agência Internacional de Pesquisa em Câncer classifica o radônio como um carcinógeno de classe I (WHO,

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As medições da concentração de radônio no ar foram executadas com o detector Alpha*GUARD*: um sistema Saphymo GmbH, modelo PQ2000PRO, que opera segundo os princípios de uma câmara de ionização pulsada. Neste trabalho, o equipamento foi programado no modo difusão e para intervalos de amostragem de 60 ou 10 minutos, atuando como um detector passivo contínuo. Quantidades e unidades especiais são usadas para caracterizar a concentração da progênie do radônio no ar como: Concentração de Energia Alfa Potencial (CEAP) e Concentração Equivalente de Equilíbrio (CEE). A CEAP é definida como sendo a soma das energias alfa potenciais emitidas pela progênie do radônio por unidade de volume de ar. Essa grandeza pode ser expressa em termos da CEE, que corresponde à concentração de radônio em equilíbrio radioativo com sua progênie de meia-vida curta, que liberaria a mesma CEAP que a mistura real não equilibrada (ICRP, 1993). As análises por espectrometria alfa, para determinação da progênie do radônio, foram realizadas utilizando o detector DOSE*man* Pro (SARAD). Neste equipamento, amostras de particulados de aerossóis são coletadas, por sucção de ar, em um filtro, que

2003). Diante disso, torna-se imprescindível avaliar a distribuição e a origem do radônio em minas subterrâneas visando mitigação e o atendimento aos padrões de proteção radiológica.

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar as concentrações de radônio e da sua progênie, calcular o fator de equilíbrio e estimar a dose dos trabalhadores em 6 minas subterrâneas no Brasil. As minas incluem extração de algamatolito, carvão, esmeralda, turmalina e scheelita. Os resultados preliminares obtidos foram reportados por Santos, 2014. Este trabalho é resultado do “Projeto Radônio” realizado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear e os resultados contribuirão para as discussões necessárias à elaboração das normas ou posições regulatórias.

é analisado continuamente por um detector de silício com respeito à energia de decaimento alfa. Utilizaram-se intervalos de amostragem de 60 minutos. O Doseman foi instalado, juntamente com o Alpha*GUARD* nas minas subterrâneas estudadas. Os pontos selecionados para amostragem foram áreas ativas das minas que retratam as condições de trabalho encontradas pelos mineiros. Nestas áreas, atividades típicas de mineração puderam ser observadas como: perfuração, detonação, transporte de materiais e manutenção de equipamentos e da estrutura de cada mina. Em cada ponto, o experimento foi conduzido continuamente por, aproximadamente, 2 dias.

Dessa forma o fator de equilíbrio (F) foi calculado através da seguinte equação (UNSCEAR, 2000): $F = CEE / C_o$. Onde C_o é a concentração de radônio no ar obtida com o Alpha*Guard*. A dose efetiva anual (H), por sua vez, foi estimada de acordo com a metodologia descrita no relatório UNSCEAR 2000, na qual: $H = C_o \cdot F \cdot T \cdot k$. Onde T é o tempo de permanência em locais de trabalho, $T = 2000 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ (ICRP, 1993), e k é o fator de conversão, $k = 9 \text{ nSv} (\text{Bq} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ (UNSCEAR, 2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios da Concentração de Radônio (C_o), da Concentração Equivalente de Equilíbrio (CEE), do Fator de Equilíbrio (F) e da Dose Efetiva anual (H) para as 6 minas subterrâneas brasileiras são apresentadas na Tabela 1.

Table 1 - Concentração de Radônio, Concentração Equivalente de Equilíbrio, Fator de Equilíbrio e Dose Efetiva Anual para 6 minas subterrâneas no Brasil

Mina	Média aritmética da concentração de radônio C_o ($Bq.m^{-3}$)	Média aritmética concentração equivalente de equilíbrio CEE ($Bq.m^{-3}$)	Fator de Equilíbrio F	Dose Efetiva H ($mSv.a^{-1}$)
Mina A	3889	1174	0,3	21
	714	377	0,5	7
Mina B	949	259	0,3	5
Mina C	113	76	0,7	1
Mina D	4964	1148	0,2	21
Mina E	1442	228	0,2	4
Mina F	327	142	0,4	3

Como pode ser observado na Tabela, obteve-se C_o e CEE na faixa de 113 a 4964 $Bq.m^{-3}$ e de 76 a 1174 $Bq.m^{-3}$, respectivamente. Os dados encontrados mostram que as concentrações de radônio e da sua progênie variam consideravelmente de mina para mina. Isso decorre da diferença de atividade específica dos radionuclídeos naturais precursores do radônio na formação geológica e das condições de trabalho distintas. Neste caso, destaca-se como principal fator a ventilação que dispõe de capacidade variada para cada mina estudada (Fathabadi *et al*, 2006). Baseado nesses dados, verifica-se que em três minas a C_o excedeu o intervalo de referência de 1000

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados mostrados e discutidos acima, somente em três minas subterrâneas (Mina A parada, Mina D e Mina E), as concentrações de radônio obtidas excederam os limites recomendados pela ICRP, 2010 e CNEN, 2005. Diante disso, medidas remediadoras devem ser adotadas em tais minas como, por exemplo, ventilação mecânica mais intensa observando o princípio

Bq/m^3 (ICRP, 2010; CNEN, 2005), são elas: Mina A parada Mina D e Mina E. O F calculado para as 6 minas variou de 0,2 – 0,7 (Tabela 1). Isso demonstra que uma ampla faixa de valores de F ocorre nas minas, o que indica que adotar um valor médio para tal fator a fim de avaliar dose para casos individuais pode proporcionar grandes erros como mencionado em Fathabadi *et al*, 2006. Nota-se que valores de equilíbrio diferentes foram encontrados para a Mina A parada e em operação, os quais são: 0,3 e 0,5 respectivamente. Esse fato pode ser explicado visto que atividades recorrentes de mineração como detonação, por exemplo, geram grandes quantidades de aerossóis no interior das galerias. Além disso, C_o diferentes também foram observadas para tal mina parada e em operação. Estas discrepâncias estão claramente influenciadas pela ventilação ativa na mina em operação.

No que se refere à dose efetiva para os trabalhadores das minas, os valores medeiam o seguinte intervalo: 1 a 21 $mSv.a^{-1}$ de acordo com a Tabela 1. A dose efetiva anual é limitada para 7 $mSv.a^{-1}$, adotando fator de equilíbrio de 0,4 e concentração de radônio de 1000 $Bq.m^{-3}$ (ICRP, 2010). Ainda segundo a Tabela 1, os valores calculados para a Mina A parada (21 $mSv.a^{-1}$) e para a Mina D (21 $mSv.a^{-1}$) estão acima do nível sugerido pela ICRP. Os valores mencionados indicam que as doses, nas quais os mineiros dessas duas minas estão submetidos excedem também o limite de 20 $mSv.a^{-1}$ aplicado para indivíduo ocupacionalmente exposto no Brasil (CNEN,2006). Isso impõe a necessidade de controle de doses ou de aperfeiçoamento dos sistemas de ventilação.

de otimização de doses estabelecido pela CNEN-NN-3.01 e/ou escalas de trabalhos adequadas com o objetivo de reduzir o tempo de exposição dos trabalhadores. Os fatores de equilíbrio obtidos variaram amplamente de mina para mina. O valor médio de 0,4 foi determinado, com um mínimo de 0,2 e um máximo de 0,7. Dessa forma, ressalta-se que a utilização de um fator médio a fim de determinar dose não é recomendada. Embora o valor médio encontrado esteja coerente com

o adotado pela ICRP e pela UNSCEAR. A dose para os trabalhadores das minas brasileiras abrangeu o intervalo de 1 a 21 mSv.a⁻¹. Conseqüentemente, na Mina A parada e na Mina D constatou-se que os valores de dose ultrapassaram os limites correspondentes da ICRP e o limite para indivíduos ocupacionalmente expostos no Brasil, o que reforça e esclarece a necessidade de mitigação. Contudo, existem diversas minas subterrâneas no Brasil que ainda serão investigadas. Trabalhos futuros serão realizados para melhor compreensão do comportamento do radônio no ambiente subterrâneo. É importante caracterizar as fontes de radônio de cada mina, entender a circulação do radônio e de sua progênie dentro desses ambientes e avaliar o risco correspondente.

REFERÊNCIAS

- Baldik, R. *et al.*, 2006. Radon Concentration Measurement in the Amasra Coal Mine, Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, 118, 122-125.
- Cile, S., Altmsoy, N., Celebi, N., 2010. Radon Concentration in Three Underground Lignite Mines in Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, 138, 78-82..
- CNEN - Brazilian Nuclear Energy Commission, 2005. **Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Minero-Industriais**. CNEN-NN-4.01 publication, Rio de Janeiro, Brazil.
- CNEN - Brazilian Nuclear Energy Commission, 2006. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. CNEN-NN-3.01 publication, Rio de Janeiro, Brazil.
- Fathabadi, N. *et al.*, 2006. Miners' Exposure to Radon and Its Decay Products in Some Iranian Non-Uranium Underground Mines. **Radiation Protection Dosimetry**, 118, 111-116.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection, 1986. **Radiation Protection of Workers in Mines**. Annals of ICRP Publication, 47, 16, Canada, United States.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection, 1993. **Protection against Radon-222 at Home and at Work**. Annals of ICRP publication 65, 23, Canada, United States.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection, 2010. **Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon**. Annals of ICRP Publication, 115, 40, Canada, United States.
- Othman, I., Al – Hushari, M., Raja, G., 1992. Radiation Exposure Levels in Phosphate Mining Activities. **Radiation Protection Dosimetry**, 45, 197 – 201.
- Santos, C. E. L., 2008. Determinação dos Processos de Enriquecimento e das Concentrações de Radônio em Minas Subterrâneas de Fluorita e Carvão do Estado de Santa Catarina: Critérios para Avaliação dos Riscos Radiológicos. Dissertação (Mestrado em Geociência). Instituto de Geociência. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Santos, T. O. *et al.*, 2014. Radon Dose Assessment in Underground Mines in Brazil. **Radiation Measurements**, 160, 120-123.
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**. Report to General Assembly, with scientific Annexes, United Nations, New York, United States.
- WHO - World Health Organization, 2003. World Cancer Report, IARC Press, Lyon.
- Yu, K. N. *et al.*, 2008. Equilibrium Factor Determination Using SSNTDs. **Radiation Measurements**. 43, pp. 357 – 363.