

Avaliação do impacto ambiental radiológico decorrente da utilização de "fosfogesso" na construção de aterros.

Vanusa Maria Feliciano Jacomino
Divisão de Monitoração Ambiental
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear / S. P.

Resumo

De forma a se avaliar o impacto ambiental radiológico decorrente da utilização de "fosfogesso" na construção de um aterro na região de Vila Parisi, Cubatão-SP, foi feita a determinação da dose equivalente efetiva levando-se em conta que a principal via de exposição do homem à radiação é a irradiação alfa nos tecidos do trato respiratório decorrente da inalação de ^{222}Rn . Inicialmente, foram feitas medidas para a determinação da concentração de ^{226}Ra em amostras de "fosfogesso" que serão utilizadas para este fim, sendo o maior valor obtido igual a 737 Bq/kg. Com este dado, foi feito o cálculo da taxa de emissão de ^{222}Rn numa superfície de 10 cm de argila sobreposta a uma camada de 1,40 m de "fosfogesso". A estimativa da dose foi feita a partir de hipóteses conservativas, utilizando-se modelos dosimétricos genéricos. O resultado final obtido foi de 0,14 mSv/ano.

Abstract

In order to evaluate the radiological environmental impact due to the use of phosphogypsum in the construction of an earth work in Vila Parisi, Cubatão-SP, the effective equivalent dose was determined. The most critical exposure pathway was considered as being the alpha irradiation of the respiratory tract due to the inhalation of radon. Preliminary measurements were performed for the determination of ^{226}Ra concentration in phosphogypsum samples which will be eventually used for this purpose. The major concentration obtained (737 Bq/kg) was used for the evaluation of the ^{222}Rn exhalation rate from a surface composed by a layer 1,40 m thick of phosphogypsum lying under another layer 10 cm thick of clay. The dose evaluation was carried out by making conservative assumptions and by using a generic model. The result obtained was 0,14 mSv/year.

1. Introdução

A principal fonte de matéria-prima da indústria nacional de fertilizantes são os minérios apatíticos, que contêm fosfatos em teores variáveis. No processo de fabricação de fertilizantes por via úmida [1] origina-se um subproduto constituído basicamente de gesso hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), que recebe a denominação de gesso industrial ou "fosfogesso". Tal resíduo vem sendo utilizado na agricultura como fonte de cálcio e enxofre para diversas culturas [2], em razão de seu baixo custo e alta produção. Além disso, diversos países do mundo utilizam este material como substituto do gesso natural para a fabricação de cimento, estuque e folhas de revestimento de paredes [3]. Atualmente, aproximadamente 5 % da produção mundial anual de "fosfogesso" é usada na indústria da construção civil [4].

Entretanto, as rochas fosfatadas contêm concentrações apreciáveis dos elementos que constituem as séries radioativas naturais do ^{238}U e ^{232}Th . Conseqüentemente, os radionuclídeos das duas séries podem estar presentes nos processos subsequentes de industrialização das rochas fosfatadas.

Este trabalho tem por objetivo descrever as metodologias adotadas para a avaliação do impacto ambiental radiológico causado pela utilização do "fosfogesso" para um aterro na região de Vila Parisi, na cidade de Cubatão-SP, onde posteriormente será construído um Terminal Intermodal.

O aterro será feito em um terreno, cuja área total é de 400.000 m². Para isso, será colocada primeiramente uma camada de 1,40 m de espessura de "fosfogesso" proveniente de algumas indústrias de fertilizantes locais e, sobreposta a ela, uma camada de argila de 10 cm de espessura.

2. Radioatividade no "fosfogesso"

Nas rochas fosfatadas, os vários membros das séries naturais do ^{238}U e ^{232}Th encontram-se em equilíbrio radioativo. Após a digestão da rocha, em plantas que utilizam o processo de via úmida para a produção do ácido fosfórico, o equilíbrio é interrompido, havendo uma redistribuição da radioatividade. Aproximadamente 86 % do ^{238}U e 70 % do ^{232}Th vão para o ácido fosfórico, enquanto que 86 % do ^{226}Ra , que tem um comportamento químico similar ao do cálcio, vai para o "fosfogesso" [5].

O decaimento do ^{226}Ra irá resultar na formação do ^{222}Rn , um gás nobre radioativo. Se o ^{222}Rn se difundir pela matriz e atingir a atmosfera livre, antes de seu decaimento, uma situação de risco potencial poderá ocorrer, uma vez que serão formados os seus produtos de decaimento de meia-vida curta (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e o ^{214}Po), que não são gases. Estes radionuclídeos poderão ser depositados no epitélio bronquial do trato respiratório, se o ^{222}Rn for inalado [6].

3. Medidas Experimentais

Amostras de "fosfogesso" foram obtidas junto a algumas indústrias de fertilizantes localizadas na cidade de Cubatão-SP, que se propuseram a fornecer material para a construção do aterro.

Uma vez recebidas as amostras, elas foram acondicionadas em recipientes plásticos e mantidas fechadas por um período mínimo de 3 semanas para atingir o equilíbrio entre os radionuclídeos de meias-vidas curtas descendentes do ^{226}Ra (^{214}Pb e ^{214}Bi) e do ^{228}Ra (^{228}Ac).

Ao final deste período, as amostras foram analisadas por espectrometria gama, utilizando-se para isso um detector de HPGGe com eficiência de 25 %, acoplado a um analisador de pulsos de 4096 canais.

Para a identificação e quantificação dos radionuclídeos presentes nas amostras foi utilizado o programa SAMPO [7], em operação no Centro de Processamento de Dados do IPEN-CNEN/SP. A atividade do ^{226}Ra foi determinada através do valor das medidas efetuadas nos fotopicos de 295.1 e 351.9 keV do ^{214}Pb . A atividade do ^{228}Ra foi determinada a partir do valor da medida no fotopico de 911.1 keV do ^{228}Ac . Os resultados encontrados são mostrados na Tabela 1.

4. Avaliação do impacto ambiental radiológico em virtude da utilização de "fosfogesso" para aterro

Para a avaliação do impacto decorrente de uma determinada prática que envolva o uso de materiais que contenham quantidades apreciáveis de elementos radioativos é preciso determinar a dose equivalente efetiva nos indivíduos do público e compará-la com os limites de dose recomendados pelas normas de proteção radiológica [8]. Neste caso, é necessária a utilização de modelos dosimétricos e metabólicos que permitam relacionar a atividade dos radionuclídeos com a dose equivalente efetiva nos indivíduos [9].

No presente trabalho, a determinação da dose equivalente efetiva foi feita levando-se em conta que a principal via de exposição do homem à radiação em virtude da utilização do "fosfogesso" para aterro seria a irradiação das partículas alfa nos tecidos do trato respiratório decorrente da inalação de ^{222}Rn . A contribuição da dose em virtude da inalação de ^{222}Rn foi desprezada, uma vez que a sua meia-vida é de 55 s.

Inicialmente, foi feito o cálculo da taxa de emissão de ^{222}Rn do conjunto camada de argila sobreposta à camada de "fosfogesso". Isto permitiu a obtenção de dados relativos à concentração de ^{222}Rn no ar, a partir dos quais foi possível avaliar a dose decorrente de sua inalação. No cálculo foi suposto que um indivíduo permanecerá no local do aterro durante 8 h/dia (2000 h/ano).

4.1. Determinação da taxa de emissão de ^{222}Rn no solo

Quando o ^{226}Ra que se encontra ligado às partículas do solo sofre o processo de decaimento radioativo, os átomos de ^{222}Rn formados dentro destas partículas deverão, primeiramente, ser ejetados e penetrar nos interstícios existentes entre as partículas, depois se mover através deles, para que finalmente possam penetrar na atmosfera livre [4]. A fração de ^{222}Rn formada nas partículas de solo e que escapa para os interstícios é conhecida como "poder de emissão", e seu valor pode variar de 1 % a 80 %, dependendo do tipo e porosidade do solo.

Os átomos de ^{222}Rn deverão se difundir através dos poros, sendo que uma pequena fração irá atingir a atmosfera antes de decair. O percurso de difusão é tortuoso e alguns átomos poderão ser ejetados em poros fechados, de onde não conseguirão escapar. O processo de difusão é descrito matematicamente pelo coeficiente efetivo de difusão, uma grandeza que leva em conta o percurso tortuoso dos átomos de ^{222}Rn antes de atingirem a atmosfera.

A taxa de emissão por unidade de área, definida como sendo a taxa de atividade transferida por unidade de área na interface solo-superfície, é expressa por [10]:

$$R = \lambda_{\text{Rn}} \cdot F_{\text{solo,ps}} \cdot C_{\text{solo,Ra}} \cdot \rho_{\text{solo}} \cdot L_{\text{Rn,solo}} \quad (1)$$

sendo:

R: taxa de emissão por unidade de área ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

λ_{Rn} : constante de decaimento do ^{222}Rn ($2,1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)

$F_{\text{solo,ps}}$: poder de emissão

$C_{\text{solo,Ra}}$: concentração de ^{226}Ra no solo (Bq/kg)

ρ_{solo} : densidade do solo (kg/m^3)

$L_{\text{Rn,solo}}$: percurso de difusão dos átomos de ^{222}Rn no solo (m), expresso por:

$$L_{\text{Rn,solo}} = \sqrt{\frac{\Delta_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{Rn}} \cdot \rho_{\text{solo,ps}}}}$$

onde

Δ_{eff} : coeficiente efetivo de difusão ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

$\rho_{\text{solo,ps}}$: porosidade do solo

4.2. Determinação da taxa de emissão de ^{222}Rn transmitida via difusão através de uma camada de material sobreposta ao solo.

Para uma determinada camada de material de espessura L sobreposta à superfície do solo, a taxa de emissão de ^{222}Rn transmitida por difusão é determinada a partir da relação (11):

$$R_T = \frac{R}{\left[\cosh\left(\frac{L}{L_{Rn,mat}}\right) + \frac{F_{solo,pe}}{F_{mat,pe}} \times \frac{L_{Rn,solo}}{L_{Rn,mat}} \sinh\left(\frac{L}{L_{Rn,mat}}\right) \right]} \quad (2)$$

sendo:

R_T : taxa de emissão do ^{222}Rn por unidade de área do material considerado ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

R : taxa de emissão por unidade de área do solo não coberto (vide equação (1)).

L : espessura de material utilizado na cobertura do solo (m)

$L_{Rn,mat}$: percurso de difusão dos átomos de ^{222}Rn no material considerado (m)

$F_{solo,pe}$: poder de emissão no material considerado.

Para a determinação da taxa de emissão de ^{222}Rn transmitida via difusão nas condições descritas no presente trabalho, a espessura de 1,40 m de "fosfogesso" utilizada para aterro foi considerada como sendo o solo não coberto e a espessura de 10 cm de argila como sendo o material sobreposto ao mesmo. A contribuição da taxa de emissão do ^{222}Rn do solo já existente no terreno, antes da construção do aterro, não foi levada em conta.

Na tabela 2 estão relacionados os valores usados para a determinação da taxa de emissão de ^{222}Rn transmitida via difusão através das camadas de "fosfogesso" e argila.

A concentração de ^{226}Ra no "fosfogesso" foi tomada como sendo 737 Bq/kg , que foi o maior valor encontrado na análise das amostras enviadas pelas indústrias de fertilizantes, como pode ser observado na Tabela 1.

Após substituição destes valores na equação (2), o resultado final obtido para a taxa de emissão de ^{222}Rn na interface argila-ar foi de $1,57 \times 10^{-1} \text{ Bq/m}^2 \cdot \text{s}$.

4.3. Determinação da dose equivalente efetiva decorrente da inalação de ^{222}Rn

O ^{222}Rn , por ser um gás nobre, está constantemente presente no volume de ar dos pulmões na mesma concentração do ar ambiente.

Supondo que todos os seus produtos de decaimento irão permanecer nos pulmões (condição de equilíbrio) e que um homem adulto respira a uma taxa de $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$, a taxa de dose equivalente em virtude da irradiação alfa dos tecidos pulmonares será dada por [12]:

$$\dot{H}_{\text{pulmão}} = 8 \cdot 10^{-10} \cdot \text{Car} \quad (3)$$

sendo:

$\dot{H}_{\text{pulmão}}$: taxa de dose equivalente no pulmão ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)

Car: concentração de ^{222}Rn no ar ambiente ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)

A dose equivalente efetiva será dada por [8]:

$$\dot{H}_E = \sum_T W_T \cdot H_T \quad (4)$$

sendo:

\dot{H}_E : taxa de dose equivalente efetiva ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)

W_T : fator de ponderação ($W_T = 0,12$ para os pulmões)

H_T : taxa de dose equivalente no órgão T ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)

Substituindo (4) em (3) tem-se:

$$\dot{H}_E = 1,8 \times 10^{-10} \text{ Car} \quad (5)$$

Para a determinação da concentração de ^{222}Rn no ar (Car), foi suposto que o indivíduo permanece submerso em uma nuvem radioativa de extensão infinita. Considerando que este indivíduo respire o ar existente dentro de um volume de $1,5 \text{ m}^3$, sendo a superfície onde se dá a emissão do gás ^{222}Rn igual a 1 m^2 e a altura de inalação para adultos que se encontram de pé igual a $1,8 \text{ m}$, a concentração do ar por hora será:

$$\text{Car} = R_T \cdot \frac{\text{área}}{\text{volume}} \quad (6)$$

Substituindo a equação (6) em (5), obtém-se \dot{H}_E igual a $6,5 \times 10^{-2} \text{ mSv/h}$. Se o indivíduo permanecer no local do aterro durante 8 h/dia (2000 h/ano) obtém-se \dot{H}_E igual a $0,14 \text{ mSv/ano}$.

5. Conclusões

Após a análise de amostras de "fosfogesso" provenientes de diferentes indústrias de fertilizantes, verificou-se que a atividade dos radionuclídeos presentes variaram significativamente de uma amostra para outra. Isto provavelmente é devido às diferentes origens das matérias-primas utilizadas.

A avaliação do impacto ambiental radiológico decorrente da

utilização do "fosfogesso" para a construção de aterros foi feita supondo-se que seria utilizado apenas material cuja atividade de ^{226}Ra fosse maior. Verificou-se que mesmo assim, a dose equivalente efetiva causada pela inalação do gás ^{222}Rn com a conseqüente irradiação alfa dos tecidos pulmonares é desprezível uma vez que o resultado obtido foi de 0,14 mSv/ano. Este valor está bem abaixo do limite de dose para indivíduos do público recomendado pelas normas de proteção radiológica, que é de 1 mSv/ano (8).

Esta avaliação foi feita a partir de hipóteses conservativas, como por exemplo a suposição de que o indivíduo possa permanecer no local do aterro durante 8 h/dia (2000 h/ano). Além disso, os parâmetros utilizados para o cálculo do fator de emissão de ^{222}Rn na interface argila-ar foram tomados da literatura, obedecendo sempre a uma condição de emissão máxima. Para se obter valores mais realistas seria necessária a realização de alguns ensaios que caracterizassem de uma forma mais específica o "fosfogesso" que será utilizado para a construção do aterro de Vila Parisi, Cubatão-SP.

Agradecimentos

Agradeço aos integrantes do Laboratório de Radiometria, Dra. Brigitte Roxana S. Pecequillo e MSc. Luzia Venturini, pela realização das análises por espectrometria gama das amostras, e ao Sr. Marcelo Francis Maduar pela colaboração na digitação do original do texto.

Referências Bibliográficas

- [1] RYAN, M. T. & COTTER, S. J. An integrated assessment of the phosphate industry. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, 1988. (ORNL-5583).
- [2] MALAVOLTA, E.; ROMERO, J. P.; LIEM, T. H. e VITTI, G. C. Gesso agrícola; seu uso na adubação e correção do solo. 2ª ed., São Paulo, ULTRAFÉRTIL, Depto. de Serviços Técnicos e Agronômicos, 1981. (Série Divulgação Técnica, 8).
- [3] CARMICHAEL, J. B. Worldwide production and utilization of phosphogypsum. Industrial Development Officer, United.
- [4] UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations, New York, 1988.
- [5] PRESSLER, J. W. Byproduct Gypsum, 1984. (ASTM STB 861). In: The Chemistry and Technology of Gypsum.
- [6] STRANDEN, E. & BERTEIG, L. Radon in dwellings and influencing factors. Health Physics, 39: 275-284, 1990.

- (7) ROUTTI, J. T. SAMPO, a FORTRAN IV program for computer analysis of gamma spectra from Ge(Li) detectors and other spectra with peaks. Berkeley, Calif. Univ., California, Oct. 1969. (UCRL-19.452).
- (8) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, 1977. (ICRP-26).
- (9) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for intakes of radionuclides by workers. Pergamon Press, Oxford, 1980. (ICRP-30).
- (10) UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources, effects and risks of ionizing radiations. United Nations, New York, 1982.
- (11) NERO, A.V. & NAZAROFF, W.W. Characterizing the source of radon indoors. Radiation Protection Dosimetry, 7:23-29, 1984.
- (12) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Limits for inhalation of radon daughters by workers. Pergamon Press, Oxford, 1981. (ICRP-32).
- (13) O'RIORDAN, M.C.; JAMES, A.C. & BROWN, K. Some aspects of human exposure to radon 222 decay products. Washington, D. C., National Council on Radiation Protection Measurements, 1987. (NCRP 94).
- (14) GEORGE, A. C. Environmental radon and radon daughters. New York, N. Y., Environmental Measurement Laboratory, 1980. (EML-383).
- (15) PENSKO, J.; STPICZYNSKA, P. & BLATON, K. Emanating power of radon-222 measured in building materials. 1980. In: Radiation Natural Environment III. p. 1407-14. (CONF-780422).

Tabela 1 - Atividade dos radionuclídeos presentes nas amostras de "fosfogesso".

Radio-nuclídeos	Atividade (Bq/kg)	
	amostra A (*)	amostra B (*)
^{226}Ra	737 \pm 74	245 \pm 25
^{214}Bi	799 \pm 80	237 \pm 24
^{214}Pb	737 \pm 74	245 \pm 25
^{228}Ra	174 \pm 18	142 \pm 14
^{228}Ac	174 \pm 18	142 \pm 14
^{224}Ra	190 \pm 19	120 \pm 12
^{212}Bi	180 \pm 18	123 \pm 12
^{212}Pb	190 \pm 19	120 \pm 12
^{208}Tl	61 \pm 6	42 \pm 4

(*) amostras de diferentes procedências.

Tabela 2 - Valores adotados [5,11,13,14,15] para determinação da taxa de
 emissão de ^{222}Rn na interface argila-ar.

parâmetros	símbolo	unidade	valores adotados
poder de emissão do fosfogesso	$F_{\text{SOLO,PS}}$	-	0,20
densidade do fosfogesso	ρ_{SOLO}	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$1,5 \times 10^3$
percurso de difusão do ^{222}Rn no fosfogesso	$L_{\text{RN,SOLO}}$	m	0,89
espessura do material (argila)	L	m	0,10
percurso de difusão do ^{222}Rn na argila	$L_{\text{RN,MAT}}$	m	0,20
poder de emissão da argila	$F_{\text{MAT,PS}}$	-	0,20