

IMPLICAÇÕES RADIOLÓGICAS DA UTILIZAÇÃO DE FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

RADIOLOGICAL IMPLICATION OF USING PHOSPHOGYPSUM AS BUILDING MATERIAL

BARBARA MAZZILLI

CÁTIA HELOISA R. SAUEIA

Large quantities (approximately 30 million tons by 1991) of phosphogypsum are produced as a by-product of the fertilizer industry in Brazil. Although phosphogypsum is mainly calcium sulfate dihydrate, it contains a high level of impurities, which originate primarily from the source phosphate rock used in fertilizer production. Among these impurities, relatively high concentrations of some uranium and thorium decay products, particularly Ra-226 and Th-232, prevent its use as a construction material or for other purposes. Phosphogypsum can replace some of the natural components of building materials. However, it contains a higher radioactivity concentration than the natural products and its use in houses may lead to increased radiation doses to the inhabitants. The material is stockpiled in huge stacks which are a potential threat to the surrounding air and especially groundwater resources. Although a considerable amount of compositional data exist in countries where phosphogypsum presents higher levels of radioactivity, comparatively few data are available concerning the Brazilian phosphogypsum. Furthermore, regulatory measures to limit such increases may be envisaged by competent national authorities, since there is a lack of national regulation or reference levels concerning the use and handling of this material. Such measures may imply certain authorised limits as well as a suitable control system. Some preliminary results concerning the use of Brazilian phosphogypsum are presented and discussed in this paper.

O fosfogesso, subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, é produzido em grande escala no Brasil. Estima-se que até meados de 1991 a quantidade de fosfogesso estocada no Brasil era de cerca de 30 milhões de toneladas. Embora a composição do fosfogesso seja basicamente sulfato de cálcio dihidratado, o material pode conter níveis elevados de impurezas que provêm da rocha fosfática que é usada como matéria prima na produção de fertilizantes. Entre essas impurezas pode ocorrer um acréscimo de radioatividade natural, devido à presença de produtos de decaimento do urânio e tório, particularmente Ra-226 e Th-232, que inviabilize seu uso como material de construção ou para outros propósitos. O fosfogesso pode ser usado como substituto de componentes naturais em materiais de construção. Entretanto, os níveis de radioatividade presentes no fosfogesso costumam ser mais elevados do que os encontrados normalmente nos materiais de construção, de forma que seu uso na construção pode, eventualmente, aumentar os níveis de exposição nas moradias. Por outro lado, a estocagem dessas enormes pilhas de fosfogesso pode se constituir em um risco potencial de contaminação do ar ambiente e especialmente das águas subterrâneas. Embora o problema tenha sido extensivamente estudado em países cujo fosfogesso apresenta níveis mais elevados de radioatividade, praticamente não existe um estudo abrangente que enfoque esse problema no fosfogesso nacional. Além do mais, medidas reguladoras para limitar esses acréscimos de radioatividade podem ser requeridas pelas autoridades competentes, pois não existe uma norma ou padrão nacional referente ao uso e manuseio deste material. Essas medidas podem implicar na definição de limites autorizados e de um sistema de controle adequado. O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir alguns resultados preliminares sobre a possibilidade de utilização do fosfogesso nacional.

Palavras-Chave: fosfogesso, radioatividade, reciclagem, material de construção

Keywords: phosphogypsum, radioactivity, recycling, building material

1 INTRODUÇÃO

A principal fonte de matéria-prima da indústria nacional de fertilizantes fosfatados são os minérios apatíticos. No processo de fabricação de ácido fosfórico, origina-se um subproduto constituído basicamente de sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), que recebe a denominação de "fosfogesso". Tal resíduo apresenta normalmente em sua composição concentrações baixas de fósforo e fluoreto, elementos traços e alguns radionuclídeos das séries naturais, que podem estar impactando negativamente o meio ambiente. A produção mundial de fosfogesso foi de 120-150 milhões de toneladas em 1980 (Carmichael, 1988) e estima-se que a produção possa atingir 220-280 milhões de toneladas no ano 2000 (Ferguson, 1988). A quantidade de fosfogesso estocada no Brasil, até meados de 1991, era de cerca de 30 milhões de toneladas.

O ácido fosfórico, que é usado na produção de fertilizantes fosfatados, pode ser obtido por dois processos: o processo de "forno elétrico", que utiliza energia elétrica para produzir fósforo elementar em uma primeira etapa; ou o processo úmido que usa o ataque químico com ácido sulfúrico. Atualmente, o processo úmido é utilizado em 90% da produção do ácido fosfórico (Becker, 1989). A rocha fosfática, composta basicamente de apatita, é tratada com ácido sulfúrico e água, produzindo fosfogesso, ácido fosfórico e ácido fluorídrico:



Uma vez cristalizado, o fosfogesso é separado da fase líquida por filtração, misturado com água e armazenado. A água do processo é reciclada. O ácido fluorídrico reage com as impurezas de silicato da rocha fosfática não dissolvido produzindo SiF_4 , que hidroliza formando o ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6).

Enquanto a razão molar entre o fosfogesso e o ácido fosfórico é 5:3, a razão de massa é de aproximadamente 3:1, isto é, aproximadamente 3 toneladas de fosfogesso são produzidas para cada tonelada de ácido.

Nas rochas fosfatadas, os vários membros das séries naturais do U-238 e Th-232 encontram-se

praticamente em equilíbrio radioativo. Isto significa que a atividade específica (números de desintegrações radioativas por unidade de tempo por unidade de massa) de todos os produtos de decaimento do urânio e do tório é a mesma do pai da série. Em alguns casos o efeito do intemperismo pode causar uma redistribuição desses radionuclídeos, especialmente devido à perda do radônio, que por ser um gás inerte, emana facilmente da rocha matriz. Na Figura 1 é ilustrada a série de decaimento radioativo do urânio. Após a digestão da rocha, em plantas que utilizam o processo por via úmida, o equilíbrio é quebrado, havendo uma redistribuição dos radionuclídeos. Isto ocorre porque durante o ataque químico os radioelementos presentes são separados e cada um passa a se comportar de acordo com as suas propriedades químicas e sua meia vida específica. Por exemplo, se o radioelemento Ra-226 for liberado para o meio ambiente sem os seus predecessores, ele irá decair de acordo com a sua própria meia vida (1622 anos), ao invés de ser controlado pelos radionuclídeos que o antecedem de meia vida mais longa. Após o ataque químico, aproximadamente 86% do U-238 e 70% do Th-232 vão para o fertilizante, enquanto que 80% do Ra-226, que tem um comportamento químico similar ao do cálcio, vai para o fosfógeno.

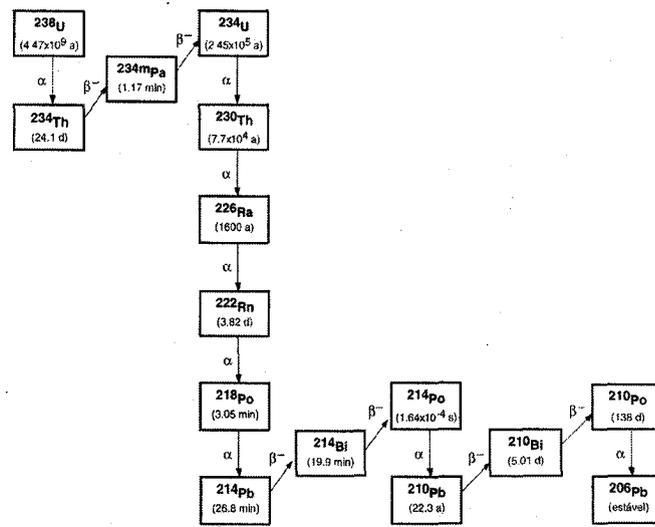


Figura 1 - Série de decaimento do ^{238}U

A maior parte do fosfógeno produzido é armazenado em pilhas ao ar livre. As principais vias de contaminação ambiental resultantes desse armazenamento são: (1) a contaminação atmosférica por fluoreto e outros elementos tóxicos; (2) poluição de águas subterrâneas por ânions lábeis, acidez, elementos traços e radionuclídeos; (3) emissão de radônio; (4) inalação de poeira radioativa; e (5) exposição direta à radiação gama. Outros problemas do armazenamento incluem o escoamento superficial, erosão e instabilidade das pilhas.

A pesquisa, visando ao desenvolvimento de possíveis usos do fosfógeno torna-se extremamente importante do ponto de vista econômico e social, pois é um produto abundante no Brasil, de baixo custo e a sua utilização evitaria a deterioração ambiental de grandes áreas onde este produto é armazenado. Naturalmente, o uso deste material pode constituir uma fonte adicional de exposição à radiação para membros do público e trabalhadores, podendo alcançar valores considerados inaceitáveis. Por outro lado, devem ser levados em conta, também, os benefícios advindos desta prática, que implica na redução dos custos totais e na reciclagem de um resíduo industrial responsável pelo aumento da deterioração do meio ambiente.

Os órgãos internacionais de radioproteção deixam a cargo de cada país a adoção de regulamentação específica para a utilização de materiais que contenham radionuclídeos naturais e, portanto, os resultados obtidos neste estudo poderão ser considerados para a tomada de decisão quanto à regulamentação nacional da utilização do fosfógeno como material a ser empregado na construção civil, a definição de limites autorizados e de um sistema de controle adequado.

2 POSSÍVEIS APLICAÇÕES DO FOSFOGENO E CRITÉRIOS DE ISENÇÃO ADOTADOS

O fosfógeno vem sendo utilizado em muitos países como um substituto do gesso na produção de cimento, como fonte de cálcio e enxofre na agricultura, como condicionador de solos que contém níveis elevados de sódio, na construção de leito de estradas e como material de acabamento na construção civil (forros para teto e painéis pré-fabricados), em razão de seu baixo custo e alta produção (UNSCEAR 1993).

No Brasil, as aplicações do fosfógeno incluem o seu uso como corretivo de solos, adição ao clínquer na produção de cimento Portland e a preparação de cargas minerais (Damasceno e Lima, 1994). O uso

do fosfogesso como corretivo de solo em substituição ao pó calcáreo só é viável nas zonas agrícolas próximas aos polos de produção de fertilizantes fosfatados. No Brasil, esses polos estão localizados em Rio Grande, extremo sul do Estado do Rio Grande do Sul, em Cubatão e em Cajati, no Estado de São Paulo, e em Uberaba, Estado de Minas Gerais. A aplicação do fosfogesso como adição ao clínquer na produção de cimento Portland, em substituição à gipsita natural, se constitui em outra alternativa interessante. Nesse caso, o sulfato de cálcio atua como agente controlador do tempo de pega do cimento, sendo adicionado em teor de até 5%, segundo a especificação brasileira. Embora viável, o uso do fosfogesso depende, novamente, da localização das indústrias de fertilizantes e das cimenteiras, sem contar que esse consumo constitui apenas 10% do total do fosfogesso produzido no Brasil. Outra alternativa para o aumento do uso do fosfogesso situa-se no segmento das cargas minerais funcionais, particularmente para a indústria de papel, em substituição ao caulim para carga e à celulose. Entretanto, esse uso também implica no aproveitamento de somente 10% do total disponível no mercado.

Portanto, verifica-se que o mercado criado com o desenvolvimento dessas tecnologias ainda é muito pequeno em relação à quantidade de fosfogesso produzida, tornando premente a investigação de novas tecnologias.

De acordo com o Safety Series número 115 (International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources), qualquer prática pode ser isenta das especificações das normas, incluindo notificação, registro ou licenciamento, desde que os valores de radioatividade estejam abaixo de um dos limites de isenção especificados para cada radionuclídeo. Para o Ra-226 e o Th-232 esses valores limite são de 10^4 Bq e 10^3 Bq para a atividade total e de 10 Bq/g e 1 Bq/g para a concentração de atividade, respectivamente. Além do mais, qualquer prática ou fonte de radiação pode ser considerada isenta, sem considerações adicionais, desde que os seguintes critérios sejam obedecidos em qualquer situação viável: (a) a dose efetiva para indivíduos do público decorrente de tal prática ou fonte de radiação "isenta" não supere 10 mSv em um ano; (b) a dose efetiva comprometida coletiva devida a um ano de atuação de tal prática não exceda 1 homem.Sv, a não ser que a avaliação da otimização da proteção radiológica da prática em questão tenha como resultado que a isenção é a melhor opção possível.

Nos Estados Unidos, a "US Environmental Protection Agency" (USEPA) estabeleceu como valor limitante de radioatividade do fosfogesso 370 Bq/kg de Ra-226, podendo ser abaixo deste valor usado para fins de agricultura. A USEPA regulamentou a distribuição e o destino do fosfogesso em decorrência principalmente do seu conteúdo de Ra-226, que decai produzindo um gás radioativo, o Rn-222. Tais considerações são importantes, pois o gesso é usado nos Estados Unidos principalmente na construção de painéis divisórios ou forros de casas. Burnett e Hull (1996) apresentaram recentemente um trabalho sugerindo a utilização do fosfogesso no chamado processo "Merseberg", que consiste na conversão deste material em dois produtos (carbonato de cálcio e sulfato de amônio). Um desses produtos, sulfato de amônio, é um excelente fertilizante pois contém enxôfre e nitrogênio. O outro produto da reação, carbonato de cálcio, poderia ser usado para neutralizar a água ácida que se produz na indústria do fosfato ou como constituinte do cimento Portland.

Na Austrália não existe uma regulamentação sobre os níveis de radioatividade em materiais de construção. Beretka e Mathew (1985) fizeram um levantamento sobre os teores de Ra-226, Th-232 e K-40 em matérias-primas naturais e subprodutos e resíduos industriais, que são usados ou apresentam potencial de uso como material de construção. As conclusões se basearam nos critérios de limitação de dose devida a materiais de construção adotados pela Alemanha (Krieger, 1981), e pela "Organisation for Economic Cooperation and Development's Nuclear Energy Agency" (OECD, 1979). Os resultados obtidos mostraram que a radioatividade natural dos materiais varia consideravelmente dependendo da sua origem, história geológica e características geoquímicas e o tipo de processamento químico empregado; alguns materiais apresentaram níveis de radioatividade acima dos limites estabelecidos. Verifica-se, portanto, que os estudos já realizados num determinado país ou região não se aplicam necessariamente para o problema específico do fosfogesso nacional, razão pela qual se justifica a realização do presente estudo.

No Brasil não existe ainda uma regulamentação relativa às atividades humanas envolvendo fontes naturais de radiação, que contemple a fiscalização de instalações que manuseiam urânio e tório associados ao subproduto ou resíduo industrial. A norma experimental da Comissão Nacional de Energia Nuclear, "Licenciamento de instalações radiativas", CNEN-NE-6.02 de Outubro de 1984, estabelece que estão isentas do processo de licenciamento as instalações que envolvam, em qualquer instante: (a) substâncias radioativas de atividade específica inferior a 100 Bq/g; (b) radionuclídeos cujas atividades totais, dentro de cada classe, não excedam os seguintes valores: classe A, 0,1 mCi ($3,7 \times 10^3$ Bq); classe B, 1 mCi; classe C, 10 mCi e classe D, 100 mCi. Os radionuclídeos Ra-226 e Th-232 são considerados classe A, ou seja, sua radiotoxicidade é muito alta. Portanto, qualquer instalação que envolva em qualquer instante concentrações de Ra-226 e Th-232 inferiores a 100 Bq/g ou atividades totais inferiores a $3,7 \times 10^3$ Bq está isenta do processo de licenciamento estabelecido pela norma. Outra norma da CNEN, "Gerência de rejeitos radioativos em instalações radiativas" (CNEN-NE-6.05), publicada no D.O.U. em 17 de

Dezembro de 1985, estabelece que rejeitos sólidos podem ser eliminados no sistema de coleta de lixo urbano desde que sua atividade específica não exceda $7,5 \times 10^4$ Bq/Kg.

A proposta deste trabalho é realizar um estudo preliminar das implicações radiológicas de se utilizar o fosfogesso como material de construção. Em particular, será avaliado o incremento de dose decorrente da utilização do fosfogesso como material de construção civil. Para este estudo serão consideradas três fontes de exposição que incluem inalação de radônio e seus filhos e exposição externa à radiação beta e gama.

3 LEVANTAMENTO DOS NÍVEIS DE RADIOATIVIDADE DO FOSFOGESSO E OUTROS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

Foi feito inicialmente um levantamento dos níveis de radioatividade presente no fosfogesso nacional. As amostras foram coletadas entre três produtores de ácido fosfórico. O sulfato de cálcio apresenta três formas cristalinas: dihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), semihidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e anidra (CaSO_4). Dependendo do processo químico usado na produção do fertilizante fosfatado, o sulfato de cálcio pode apresentar-se na forma dihidratada ou semihidratada. Conseqüentemente, uma diferença de até 15,7% pode ocorrer na massa das moléculas resultantes. Portanto, de forma a se obter resultados confiáveis torna-se necessário estabelecer um procedimento de homogeneização e secagem das amostras apropriado pois as análises radioquímicas baseiam-se em determinações gravimétricas. As amostras de fosfogesso foram secas em estufa, evitando temperaturas superiores a 45°C de forma a prevenir perdas por volatilização, até massa constante. As amostras foram então moídas até atingirem uma granulometria inferior a 250 μm e finalmente armazenadas à temperatura ambiente em dessecador. Foi verificado por difração de raios-X que a forma cristalina predominante no fosfogesso estudado é a dihidratada.

A determinação da concentração dos radionuclídeos K-40, Ra-226 e Th-232 nas amostras de fosfogesso foi feita por espectrometria gama. As amostras foram hermeticamente fechadas para possibilitar o estabelecimento do equilíbrio entre Ra-226 e seus produtos de decaimento. O K-40 foi determinado diretamente pela sua linha de 1460,8 keV. A determinação da concentração de Th-232 foi feita pela medida dos picos de 583,1 keV e 968,9 keV, correspondentes à energia gama emitida pelo Tl-208 e Ac-228, respectivamente. Se os resultados referentes a estas linhas diferirem, significa que não há equilíbrio radioativo entre o Tl-208 e o Ac-228. Neste caso, a concentração do Th-232 foi inferida a partir da concentração de Ac-228. Para a determinação do Ra-226, pressupõe-se que este esteja em equilíbrio com Pb-214 e Bi-214. Sua atividade foi determinada pelas linhas de seus produtos filhos Pb-214 (295,2 e 351,9 keV) e Bi-214 (609,3 Kev). A linha gama de 186,2 keV associada ao decaimento alfa do Ra-226 para o Rn-222 não foi utilizada para a determinação do Ra-226, devido à sua baixa abundância e à interferência da linha gama de 185,7 keV do U-235.

Os resultados preliminares obtidos no presente trabalho para o fosfogesso e o gesso de construção nacionais são apresentados na Tabela 1. Para efeito de comparação, foi também realizado um levantamento dos dados já publicados sobre os níveis de radioatividade presentes em outras matérias-primas utilizadas na construção civil, os resultados extraídos da literatura são apresentados na Tabela 2.

TABELA 1

VALORES MÉDIOS DA CONCENTRAÇÃO DE ATIVIDADE DE RADIONUCLÍDEOS NATURAIS NO FOSFOGESSO NACIONAL DE DIVERSAS PROCEDÊNCIAS E DO GESSO DE CONSTRUÇÃO EM BQ/KG.

Fosfogesso nacional	Ra-226	Th-232	K-40
A (8)	673±68	150±28	<27
B (4)	108±43	114±39	<27
C (4)	28±8	16±6	<27
Gesso de construção (3)	<3	<5	<27

TABELA 2

RADIOATIVIDADE PRESENTE EM MATÉRIAS PRIMAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

(extraído do relatório "Exposure to Radiation from the Natural Radioactivity in Building Materials" da OECD)

	Ra-226	Th-232	K-40
Areia e pedra	<15 - 37	<18 - 43	33 - 1034
Cimento	22 - 55	18 - 47	155 - 241
Concreto	26 - 1295	18 - 101	241 - 1299
Tijolo	4 - 281	5 - 233	12 - 1058
Granito	89 - 100	80 - 81	1106 - 1299
Gesso de Construção	4 - 22	<1 - 7	11 - 141
Fosfogesso	15 - 1221	10 - 62	41 - 96

O valor médio obtido para a atividade de Ra-226 no fosfogesso nacional de três procedências diferentes variou de 673 Bq/kg a 28 Bq/kg. Os desvios padrão relativos correspondentes mostram que a dispersão dos valores obtidos em torno da média é pequena e que, portanto, os resultados encontrados podem ser considerados como representativos dos locais amostrados. Os valores médios obtidos para

o Th-232, por outro lado, não apresentaram variação significativa entre as amostras procedentes de A e B. A concentração encontrada para o K-40 esteve sempre abaixo do limite de detecção do sistema de contagem utilizado, indicando que este radionuclídeo não contribui de forma significativa para a radioatividade presente no fosfogesso brasileiro. A atividade encontrada no gesso de construção para os três radionuclídeos estudados esteve sempre abaixo dos limites de detecção do sistema utilizado. Os resultados obtidos para a atividade do Ra-226, Th-232 e K-40 no fosfogesso brasileiro indicam que o intervalo de concentração é bastante amplo, porém dentro do intervalo encontrado na literatura.

4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

No relatório "Exposure to Radiation from the Natural Radioactivity in Building Materials", publicado pela OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) com sede em Paris, em maio de 1979, é apresentado um levantamento sobre o incremento de exposição à radiação dos indivíduos do público, decorrente do uso de materiais de construção contendo níveis de radioatividade acima dos valores considerados normais.

O conceito básico de limitação de dose estabelece, para materiais de construção, que uma dose de 1 mSv/ano, devida à exposição externa, é aceitável para indivíduos do público, desde que seja considerado, adicionalmente, o limite de dose de 1 mSv/ano devida à emanção do radônio através das paredes e conseqüente inalação.

Um dos modelos adotados para definir limites para a radioatividade natural em materiais de construção (Steger et al, 1992; Swedjemark, 1977) estabelece que a atividade presente no material deve ser tal que a dose devida à radiação gama dentro da moradia não exceda o limite de 1 mSv/ano, de acordo com a equação:

$$C(\text{Ra-226})/370 + C(\text{Th-232})/260 + C(\text{K-40})/4810 < 1$$

Nesta equação, C(X) indica a concentração de radioatividade em Bq/kg. Se a inalação do radônio e seus produtos de decaimento forem considerados, a equação tem que ser reformulada levando em conta a exposição adicional decorrente da inalação (Wicke, 1979). A equação resultante pode ser expressa por:

$$(C(\text{Ra-226})/740) (1 + 0,1 e r d) + C(\text{Th-232})/520 + C(\text{K-40})/9620 < 1$$

onde e representa o fator de emanção do radônio das paredes, r é a densidade em kg/m³ e d é a espessura da parede em metros. No caso de os valores de e, r e d serem desconhecidos, pode-se usar dados disponíveis na literatura: respectivamente 0,1, 2000 kg/m³ e 0,3 m. Algumas suposições foram feitas para que se pudesse acrescentar o efeito da exposição interna devido à inalação do radônio:

- 1 a razão da área superficial em relação ao volume do ambiente foi considerada como sendo 2 m⁻¹;
- 2 uma concentração de radônio no ar de 37 Bq/m³, com um fator de equilíbrio de 0,5, resulta em uma dose equivalente efetiva de aproximadamente 1 mSv/a;
- 3 a taxa de ventilação média anual do ambiente foi considerada como sendo 0,7 h⁻¹.

A concordância com as equações apresentadas significa que um morador hipotético de uma moradia construída com o material considerado não deve receber uma dose de radiação superior a 2 mSv/a, devida à radioatividade presente nas paredes. Essas equações, entretanto, não consideram a dose total dentro das moradias, pois esta depende também de outros fatores não incluídos, tais como a emanção do radônio do solo sobre o qual a moradia foi construída e a irradiação externa. O limite de 2 mSv/a, devido ao material de construção, corresponde a um valor médio de dose total encontrada dentro das moradias.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para os níveis de radioatividade no fosfogesso nacional apresentam uma faixa de variação bastante ampla, especialmente para o radionuclídeo Ra-226. Substituindo-se os valores médios encontrados para o fosfogesso de procedências diferentes nas equações, obtém-se uma dose acima dos limites estabelecidos para o caso A e B se considerarmos a inalação do radônio e seus produtos de decaimento e conseqüente irradiação interna. Se considerarmos a irradiação externa beta e gama, somente o fosfogesso de procedência A irá implicar em uma exposição acima dos limites considerados. Conclui-se, portanto, nesta avaliação preliminar, que a utilização do fosfogesso nacional não deve ser imediata, requerendo ainda um estudo mais detalhado.

Algumas sugestões podem ser feitas para estudos complementares: (1) avaliar as implicações radiológicas da utilização do fosfogesso nacional considerando-se a procedência da matéria-prima, uma vez que a faixa de variação da atividade encontrada foi bastante ampla, especialmente para a atividade do radionuclídeo Ra-226. Os valores mínimos, encontrados nas amostras de procedência C,

acarretam uma dose inferior aos limites estabelecidos; (2) estudar a possibilidade de se reduzir os valores de radioatividade encontrados na matéria-prima; (3) utilizar o fosfogesso juntamente com outros materiais de construção, de forma que a soma ponderada de todos os componentes utilizados obedeça aos critérios pré-estabelecidos; (4) utilizar modelos mais realísticos que descrevam o transporte dos radionuclídeos no interior de uma casa hipotética por meio de medidas experimentais. Estas irão incluir o levantamento de dados tais como: densidade do fosfogesso, fator de ventilação, dimensões da casa e espessura da parede, fator de emanção do radônio, concentração do radônio no interior da casa, etc.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BECKER, P. Phosphates and phosphoric acid: raw materials, technology and economics of the wet process. *Fert. Sci. Technol.*, New York, v.6, p.752, 1989.
- BERETKA, J., Mathew, P.J. Natural radioactivity of australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics*, v. 48, p. 87-95, 1985.
- BURNETT, W.C., Hull, C.D. Problems and possible remedies concerning norm in by-product gypsum produced by the phosphate industry. In: *HEALTH PHYSICS SOCIETY MEETING*, Scottsdale, 1996. (Sem outros dados bibliográficos)
- CARMICHAEL, J.B. Worldwide production and utilization of phosphogypsum. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHOGYPSUM*, 2. Miami, 1988. *Proceedings*. s.l.p. : FIRP, s.d v.1, p.105-116, 1988. (FIPR Pub n 01-037-055).
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Licenciamento de instalações radioativas*. s.l.p., out.1994. (CNEN-NE-6.02).
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Gerência de rejeitos radioativos em instalações radioativas*. s.l.p., nov. 1995. (CNEN-NE-6.05).
- DAMASCENO, E.C., Lima, J.R.B. Aproveitamento de resíduos da industria de mineração: o fosfogesso gerado pela solubilização de concentrados fosfático. *Congresso Italo Brasileiro de Engenharia Mineraria*, 3. Verona, set. 26-27, 1994. (Sem outros dados bibliográficos)
- FERGUSON, F. Phosphogypsum-an overview. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHOGYPSUM*, 2. Miami, 1988. *Proceedings*. s.l.p. : FIRP, s.d v.1, p.117-130, (FIPR Pub n 01-037-055).
- KRIEGER, R. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertgteil-Techn.*, v.47, p. 468, 1981.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT, Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. France, 1979. (Report by a Group of Experts of the OECD Nuclear Energy Agency).
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*. Vienna, 1996. (IAEA-SS-115).
- STEGER, F., Kunsch, B., Buchner, I. Önorm S 5200. Radioactivity in building materials (a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials). *Radiat. Prot. Dos.*, v.45, n.1/4, p. 721-722, 1992.
- SWEDJEMARK, G.A. *The ionizing radiation in dwellings related to the building materials*. Stockholm: National Institute of Radiation Protection, 1977. (SS1:1977-004).
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. *Sources, effects and risks of ionizing radiations: report to the general assembly, with annexes*. New York, 1993.
- WICKE, A. *Untersuchungen zur frage der Natürlichen Radioaktivität der luft in wohn-und Aufenthaltsträumen-grundlagen zur Abschätzung der Strahlenexposition durch inhalation von radon und zerfallsprodukten*. Giessen, 1979. Thesis (University of Giessen)

BARBARA MAZZILLI
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Caixa Postal 11049
São Paulo - Brasil
E-mail: mazzilli@net.ipen.br

CATIA SAUEIA
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
E-mail: saueia@usp.br