AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO ^{222}Rn NO GALPÃO DA
SALVAGUARDAS DO IPEN**

LILIAN SAUEIA CACCURI

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-
Aplicações.**

Orientador:

Dra. Marcia Pires de Campos

SÃO PAULO

2007

Dedico este trabalho

aos meus pais,
meu marido Marco
e minha filha Camila.

Agradecimentos

- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade de realizar este trabalho.
- À Dra. Marcia Pires de Campos pela oportunidade dada a mim para realizar este trabalho. Pela orientação. Por muito me ensinar. E pela paciência nos meus momentos difíceis.
- Aos meus pais pelo constante apoio. Sem vocês nada seria.
- Ao Marco pelo amor, compreensão e incentivo. Saiba que suas palavras me fizeram refletir.
- À Camila por ser a razão da minha vida.
- Aos meus irmãos, Regina, Mônica, Mirian e Augusto, ao meu cunhado Tadeu e aos meus sobrinhos e sobrinhas pelo grande amor e por sermos uma família sempre unida.
- À minha cunhada Cátia por me indicar um novo caminho.
- À Dra. Brigitte Roxana Soreanu Pecequilo por me aceitar no início do trabalho.
- Ao Dr. Paulo Ernesto Lainetti, Centro de Química e Meio Ambiente, pelo auxílio na colocação e troca dos detectores de traços.
- À minha amiga Simone Alberigi pelas dicas importantes, pela amizade sincera e por sempre me dar forças em todas as situações. Saiba que poucas pessoas são especiais para mim, você é uma delas.
- Ao Marcelo Bessa por sempre me ajudar e que com grande paciência, muito me ensinou.
- Aos amigos Elaine, Keila, Freddy pelo apoio, carinho, amizade e pelos bons momentos passados em nossa sala.
- A todos os amigos que fiz no Laboratório de Radiometria Ambiental (LRA). Foi uma época marcante na minha vida.
- A todos amigos que me acompanharam, sempre me dando apoio e incentivo.

AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL AO ^{222}Rn NO GALPÃO DA SALVAGUARDAS DO IPEN

Lilian Saueia Caccuri

RESUMO

Neste trabalho foi avaliada a exposição ao ^{222}Rn para os trabalhadores que executam atividades no galpão da Salvaguardas do *ipen*, por meio da estimativa da dose efetiva comprometida recebida por esses indivíduos. Para tanto foram determinadas as concentrações de ^{222}Rn no interior do galpão da Salvaguardas pelo método de detecção passiva com detectores de traços nucleares do estado sólido (SSNTD). O detector utilizado foi o policarbonato Makrofol E de 1 cm^2 , inserido em uma câmara de difusão do tipo KFK. Foram monitorados 14 pontos no interior de galpão e um ponto externo durante um período total de 21 meses, trocando-se os detectores a cada três meses, entre Dezembro de 2004 e Setembro de 2006. As concentrações de ^{222}Rn obtidas variaram entre 196 ± 9 e $2048 \pm 81\text{ Bq/m}^3$. A dose efetiva comprometida devido à inalação de radônio no galpão da Salvaguardas do IPEN foi calculada, de acordo com os procedimentos da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) a partir da quantidade de ^{222}Rn incorporada e de um fator de conversão de dose. Os resultados obtidos encontram-se abaixo do limite anual de 20 mSv/a , estabelecido pela ICRP 60, para indivíduos ocupacionalmente expostos.

ASSESSMENT OF ^{222}Rn OCCUPATIONAL EXPOSURE AT IPEN NUCLEAR MATERIALS STORAGE SITE

Lilian Saueia Caccuri

ABSTRACT

In this study it was assessed the occupational exposure to ^{222}Rn at *ipen* nuclear materials storage site through the committed effective dose received by workers exposed to this radionuclide. The radiation dose was calculated through the radon concentrations at nuclear materials storage site. Radon concentrations were determined by passive detection method with solid state nuclear detectors (SSNTD). The SSNTD used in this study was the polycarbonate Makrofol E; each detector is a small square plastic of 1 cm^2 , placed into a diffusion chamber type KFK. It was monitored 14 points at nuclear materials storage site and one external point, over a period of 21 months, changing the detectors every three months, from December 2004 to September 2006. The ^{222}Rn concentrations varied from 196 ± 9 e $2048 \pm 81\text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$. The committed effective dose due to radon inhalation at IPEN nuclear materials storage site was obtained from radon activity incorporated and dose conversion factor, according to International Commission on Radiological Protection procedures. The effective committed dose received by workers is below $20\text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$. This value is suggested as an annual effective dose limit for occupational exposure by ICRP 60.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Radiação	1
1.2 Radônio	4
1.3 Motivação para o trabalho.....	5
2 OBJETIVOS DO TRABALHO	7
2.1 Descrição do local de estudo	7
3 METODOLOGIA	10
3.1 Métodos de detecção de ^{222}Rn no ar	10
3.1.1 Métodos de detecção ativa	10
3.1.2 Métodos de detecção passiva	11
3.2 Detectores de traços nucleares do estado sólido	12
3.3 Determinação da concentração de ^{222}Rn no ar	13
3.4 Fator de calibração	15
3.5 Cálculo da dose efetiva comprometida	15
4 PARTE EXPERIMENTAL	18
4.1 Montagem das câmaras de difusão	18
4.2 Colocação dos detectores no galpão da Salvaguardas do <i>ipen</i>	20
4.3 Procedimento para a obtenção da densidade de traços	23
4.4 Determinação da radiação de fundo	25
4.5 Determinação do fator de calibração	26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Concentração de ^{222}Rn no galpão da Salvaguardas do <i>ipen</i>	30
5.2 Estimativa da dose efetiva comprometida	43
6 CONCLUSÕES	45
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Radiação

É fato que a população mundial está constantemente exposta às fontes de radiação, quer sejam elas de origem natural ou de origem artificial. Sabe-se também que as fontes de radiação de origem natural são responsáveis por cerca de 70% da dose efetiva recebida pela população mundial (UNSCEAR, 2000).

As fontes naturais de radiação podem ser classificadas em fontes externas, tais como os raios cósmicos e os elementos radioativos presentes no solo e nos materiais de construção, e em fontes internas, resultantes da inalação e ingestão de elementos radioativos naturais presentes no ar e na dieta alimentar.

Os radionuclídeos naturais são divididos em primordiais, aqueles com meia-vida muito longa, da mesma ordem de grandeza da idade da Terra, e cosmogênicos, aqueles produzidos pela interação da radiação cósmica com a superfície terrestre.

Os radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre podem ser classificados em radionuclídeos que compõem as séries radioativas do ^{238}U (meia-vida de $4,47 \times 10^9$ anos), do ^{232}Th (meia-vida de $1,40 \times 10^{10}$ anos) e do ^{235}U (meia-vida de $7,04 \times 10^8$ anos) e que decaem para isótopos estáveis do chumbo, e em radionuclídeos naturais, como o ^{40}K (meia-vida de $1,28 \times 10^9$ anos) que decaem diretamente para um nuclídeo estável (NCRP-45, 1975). As três séries radioativas naturais são apresentadas na FIG. 1.1.

Em relação às séries radioativas naturais, o maior interesse concentra-se nas séries do ^{238}U e do ^{232}Th , uma vez que o primeiro representa 99,27% do urânio natural que é encontrado em toda a crosta terrestre na forma de minérios de urânio e em quantidades traço em todos os tipos de rochas e minerais e o tório que é encontrado em várias rochas e solos com 100% de ^{232}Th . O conteúdo de tório em rochas ígneas é aproximadamente quatro vezes maior que o conteúdo de urânio, mas a atividade específica de $4,07 \text{ kBq/g}$ do ^{232}Th é

menor que a de 12,2 kBq/g do ^{238}U , o que significa que, mesmo com maior quantidade de tório nas rochas, a radioatividade devida aos dois radionuclídeos é aproximadamente igual. Já o ^{235}U contribui com apenas 0,7% do urânio natural (Eisenbud, 1987).

A exposição total a que a população está submetida recebe algumas contribuições, tais como a do ^{40}K , que são constantes no espaço e no tempo e praticamente independentes das atividades e costumes humanos (UNSCEAR, 1993). Outras contribuições são variáveis e dependem fortemente das atividades e costumes humanos, tais como as doses por inalação dentro de uma residência, causadas pelos produtos de decaimento dos isótopos do radônio, que dependem do tipo de construção, do material utilizado e da taxa de ventilação (Campos, 1994, Campos e Pecequillo, 2003). Em relação à exposição ocupacional, a dose recebida pelos trabalhadores de minas de urânio também depende, entre outros fatores, da ventilação no local de trabalho (ICRP-32, 1981).

A inalação de radônio é conhecida como um importante risco ao sistema respiratório, principalmente pela incorporação dos seus descendentes de meia-vida curta (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi e ^{214}Po), que sozinhos ou agregados a outras partículas podem se depositar nos pulmões (Porstendorfer, 1993). Na natureza são encontrados três isótopos do radônio, o ^{222}Rn , chamado de radônio, originário da série do ^{238}U , o ^{220}Rn , conhecido como torônio que é originado da série do ^{232}Th e o ^{219}Rn , conhecido como actinônio, originário da série do ^{235}U .

Geralmente, o ^{222}Rn é o foco de atenção em termos da exposição dos indivíduos ao radônio, pois dentre todos os isótopos, ele é o que apresenta maior meia vida física (3,8 dias) e possui a capacidade de se difundir através do solo e de materiais de construção, emanando para o interior dos ambientes, enquanto os outros isótopos (^{220}Rn e ^{219}Rn) apresentam meia-vida relativamente curta de 55,6 s e 3,96 s, respectivamente e têm grande dificuldade em se difundir através dos materiais.

Uma vez que na crosta terrestre encontra-se sempre urânio (^{238}U) que sua série decai para radônio (^{222}Rn), é natural que tenha havido e haja atualmente um grande interesse em avaliar-se a dose causada por esse radionuclídeo (UNSCEAR 1993, Paulo, 1991; AL-KOFAHI et. al, 1992, Campos et al., 2002).

SÉRIE DO ^{238}U									
Np									
U	^{238}U $4,5 \times 10^9 \text{ a}$		^{234}U $2,5 \times 10^5 \text{ a}$						
Pa	$\downarrow$	^{234}Pa $1,17 \text{ m}$	$\downarrow$						
Th	^{234}Th 24 d		^{230}Th $8 \times 10^4 \text{ a}$						
Ac		$\downarrow$							
Ra			^{226}Ra 1620 a						
Fr			$\downarrow$						
Rn			^{222}Rn $3,82 \text{ d}$						
At			$\downarrow$						
Po			^{218}Po $3,05 \text{ m}$		^{214}Po $182 \mu\text{s}$		^{210}Po 138 d		
Bi			$\downarrow$	^{214}Bi $19,6 \text{ m}$	$\downarrow$	^{210}Bi 5 d	$\downarrow$		
Pb			^{214}Pb $26,8 \text{ m}$		^{210}Pb 22 a		^{206}Pb estável		
Tl									

SÉRIE DO ^{232}Th									
			^{232}Th $1,4 \times 10^{10} \text{ a}$		^{228}Th $1,9 \text{ a}$				
			$\downarrow$	^{228}Ac $6,13 \text{ h}$	$\downarrow$				
			^{228}Ra $5,7 \text{ a}$		^{224}Ra $3,64 \text{ d}$				
					$\downarrow$				
					^{220}Rn $55,6 \text{ s}$				
					$\downarrow$				
					^{216}Po $0,15 \text{ s}$		^{212}Po $0,3 \mu\text{s}$		
					$\downarrow$	^{212}Bi $60,6 \text{ m}$	$\downarrow$		
						^{212}Pb $10,6 \text{ h}$	^{208}Pb estável		
							^{208}Tl $3,1 \text{ m}$		

SÉRIE DO ^{235}U									
			^{235}U $7 \times 10^8 \text{ a}$						
			$\downarrow$	^{231}Pa $3,3 \times 10^4 \text{ a}$					
			^{231}Th $25,6 \text{ h}$	$\downarrow$	^{227}Th $18,7 \text{ d}$				
				^{227}Ac 22 a	$\downarrow$				
					^{223}Ra $11,4 \text{ d}$				
					$\downarrow$				
					^{219}Rn $3,9 \text{ s}$				
					$\downarrow$				
					^{215}Po $1,8 \text{ ms}$				
					$\downarrow$	^{211}Bi $2,15 \text{ m}$			
						^{211}Pb $36,1 \text{ m}$	^{207}Pb estável		
							^{207}Tl $4,8 \text{ m}$		

FIGURA 1.1 - Séries naturais do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U

1.2 Radônio

O ^{222}Rn é um gás nobre, radioativo e como qualquer outro gás nobre é incolor e inodoro e dificilmente interage com outros elementos. Membro da série radioativa do ^{238}U é formado a partir da desintegração alfa do ^{226}Ra . Pelo fato de ser um gás inerte e, portanto não interagir com o trato respiratório, os danos biológicos devido a sua inalação são causados pelos seus filhos de meia vida curta, os radioisótopos ^{218}Po , ^{214}Pb e ^{214}Bi .

Os filhos do radônio são isótopos de metais pesados que se fixam facilmente aos aerossóis presentes na atmosfera e seu decaimento radioativo se dá por emissão de partículas alfa e beta e raios gama. A seguir (TAB. 1.1) são apresentadas as propriedades radioativas do ^{222}Rn e dos seus produtos de decaimento.

TABELA 1.1 – Propriedades radioativas do ^{222}Rn e de seus produtos de decaimento

	Isótopo	Meia vida	Radiação	E α (MeV)
Radônio	^{222}Rn	3,83 dias	α	5,49
Filhos do Radônio				
Meias - vidas curtas	^{218}Po	3,05 minutos	α	6,00
	^{214}Pb	26,8 minutos	β , γ	
	^{214}Bi	19,7 minutos	β	
	^{214}Po	164 μ segundos	α	7,68
Meias - vidas longas	^{210}Pb	22,3 anos	β	5,30
	^{210}Bi	5,01 dias	β	
	^{210}Po	138,4 dias	α	

No ambiente externo, a céu aberto, o radônio e seus produtos de decaimento apresentam baixos níveis de concentração devido a sua contínua dispersão na atmosfera. Entretanto, em ambientes fechados, como no caso das minas subterrâneas, das casas e edifícios e de locais de trabalho onde haja materiais radioativos e onde normalmente a taxa de ventilação e renovação do ar

são reduzidas, sua concentração pode atingir níveis bastante elevados. O radônio que está presente no ar é inalado e apenas uma pequena fração deste é devolvida para a atmosfera por expiração (Yaginuma, 1993). Como descrito anteriormente, os descendentes de meia-vida curta do radônio são os responsáveis pela maior parte da dose recebida pelo sistema respiratório e por outras regiões, pois parte desses elementos é depositada no pulmão e daí transferida para outros órgãos e tecidos.

A exposição ao ^{222}Rn representa um grande risco ao sistema respiratório e a estimativa dos danos à saúde devido à sua inalação vem sendo extensivamente estudada, sendo os mineiros de urânio a principal fonte de informações sobre a relação entre inalação de radônio e casos de câncer de pulmão (ICRP-32, 1981).

As concentrações do radônio num ambiente podem se tornar elevadas, entre outros fatores, pela falta de ventilação e pela presença de grandes concentrações de elementos radioativos das séries do ^{238}U e do ^{232}Th .

Dentre as fontes de exposição ao radônio, estão as atividades ocupacionais, em especial as que envolvem o manuseio de materiais radioativos de ocorrência natural, do inglês, “*natural occurring radioactive materials*” (NORM), que aumentam significativamente a exposição para os trabalhadores, principalmente pela inalação e ingestão de aerossóis e pela inalação de ^{222}Rn (Hipkin et al., 1998, Sohrabi, 1998, Misdaq e Amghar, 2005, Sousa et al., 2005). Vários estudos têm mostrado a importância e a crescente preocupação na avaliação dos níveis de radônio no ar ambiente e a conseqüente dose de radiação recebida pelos trabalhadores que manipulam materiais contendo altas concentrações de urânio e tório (Kathren, 1998, Campos e Pecequillo, 2007, Orlando et al., 2002).

1.3 Motivação para o trabalho

Existe no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (*ipen*), em São Paulo-SP (Brasil), um grupo de Salvaguardas Nucleares, que tem como atribuições o controle e a contabilidade dos materiais nucleares, detectando e evitando perdas, desvios e o uso não autorizado desses materiais, bem como o cumprimento das obrigações assumidas pelo país em acordos de Salvaguardas.

A armazenagem dos materiais Salvaguardados é feita numa instalação denominada galpão III – depósito central (galpão da Salvaguardas).

No galpão da Salvaguardas são armazenadas grandes quantidades de materiais contendo urânio e tório, o que pode implicar em concentrações elevadas dos isótopos de radônio no ar. Entretanto, até o início deste trabalho, não havia informações sobre as concentrações de radônio no ar ambiente e conseqüentemente sobre os níveis de dose a que estão submetidos os trabalhadores que executam atividades no interior do galpão.

A partir do ano de 2005, o local passou por uma reestruturação com a substituição dos antigos tambores metálicos que armazenavam os materiais nucleares por outros mais novos e de material plástico e a mudança na configuração de distribuição dos mesmos. Com essa mudança, houve a necessidade de se avaliar os níveis de ^{222}Rn no ar ambiente uma vez que esse tipo de estudo nunca havia sido feito, assim, atendendo uma necessidade da instituição iniciou-se este trabalho de pesquisa para avaliar a exposição do ^{222}Rn no galpão da Salvaguardas do ipen .

2. OBJETIVO DO TRABALHO

A partir do exposto, este trabalho tem como objetivo a avaliação da exposição ocupacional ao ^{222}Rn no galpão da Salvaguardas do ipen. Para tanto serão determinados os níveis de radônio no galpão da Salvaguardas e, a partir disso, será feita a estimativa da dose de radiação recebida pelos indivíduos ocupacionalmente expostos.

Os níveis de radônio no ar ambiente serão determinados pelo método de detecção passiva com detectores de traços nucleares do estado sólido (Makrofol E) e a avaliação da dose recebida pelos trabalhadores devido à inalação desse radionuclídeo, será feita a partir dos procedimentos descritos pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP).

2.1. Descrição do local de estudo

O galpão da Salvaguardas é uma instalação de aproximadamente 150 m de comprimento por 20 m de largura, sem janelas, com duas portas, uma principal posicionada na parte frontal, cujas dimensões são 4m por 5m, por onde a maior parte dos materiais nucleares é colocada e outra de 1m por 1,80 m, localizada nos fundos e que dá acesso a uma ante-sala onde os trabalhadores manipulam os materiais nucleares que serão transferidos de tambores. Neste galpão encontram-se armazenados matérias que contém urânio e tório, tais como: UF_4 (tetrafluoreto de urânio), diuranato de amônia, varetas de elemento combustível, torta siliconada (rejeito sólido contendo tório), retoter (resíduo de tório e terras raras gerado na produção e purificação do nitrato de tório puro), rejeito DUS (diuranato de sódio), entre outros.

A planta do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares com a localização do galpão da Salvaguardas é apresentada na FIG. 2.1.

Nas FIG. 2.2 e 2.3 são apresentadas as vistas frontal externa e lateral externa do galpão da Salvaguardas.

Figura 2.1: Planta geral do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares com a localização do galpão da Salvaguardas

Figura 2.2: Vista externa frontal do galpão da Salvaguardas

Figura 2.3: Vista externa lateral do galpão da Salvaguardas

3 METODOLOGIA

3.1 Métodos de detecção do ^{222}Rn no ar

É possível determinar-se a concentração de ^{222}Rn no ar por vários métodos diferentes que podem ser classificados em instantâneos ou contínuos, conforme o seu tempo de duração. Esses métodos podem ainda ser subdivididos em duas técnicas básicas de detecção, a ativa e a passiva. Na técnica de detecção ativa há o processo de bombeamento do ar sobre um filtro e posterior medida desse filtro. Já na técnica passiva, o princípio de funcionamento baseia-se na adsorção e permeabilidade do radônio em determinados materiais. Neste caso, os detectores são simplesmente expostos ao ar ambiente e posteriormente analisados.

A escolha do método de medida deve ser baseada no tipo de informações que se deseja obter, nas características do local monitorado, no tempo de amostragem, na sensibilidade dos instrumentos e nos custos do projeto.

3.1.1 Métodos de detecção ativa

Os principais métodos de detecção ativa do radônio são: o método de Kusnetz e o método dos Dois Filtros.

No método de Kusnetz, o ar é bombeado através de um filtro para o interior de uma célula de cintilação (célula de Lucas) e após o tempo de equilíbrio radioativo (aproximadamente 90 minutos) entre o ^{222}Rn e os seus filhos de meia-vida curta, a célula, acoplada a uma válvula fotomultiplicadora é medida em um sistema protegido contra a luz (Scintrex, 2005).

Já no método dos Dois Filtros, um determinado volume de ar é bombeado através de um sistema composto por um filtro de entrada que retém aerossóis atmosféricos, principalmente produtos de decaimento do radônio, uma câmara ou tubo e um segundo filtro de saída que coleta os filhos produzidos no interior da câmara. Após o bombeamento do ar, o segundo filtro é medido (geralmente num detector cintilador de ZnAg) e a partir das correções para o

crescimento e decaimento dos produtos filhos e para a perda de filhos que ficaram retidos nas paredes do tubo obtêm-se a atividade do gás radônio (NCRP-97, 1988).

Existe ainda o método em que o ar é bombeado sobre um filtro de fibra de vidro ou de papel e este é medido num detector de barreira de superfície (NCRP-97, 1988). Por meio da técnica de espectrometria alfa é possível obter-se a concentração dos elementos filhos que ficaram retidos no filtro e a partir destes, a concentração de radônio no ar.

3.1.2 Métodos de detecção passiva

Na detecção passiva, os métodos mais utilizados são: o carvão ativado, os dosímetros termoluminescentes (TDL) e os detectores sólidos de traços nucleares (Al-Kofari et al., 1992, Nikezic e Urosevic, 1998, Durrani, 2001, Campos et al., 2002, Turek et al., 2004, Alberigi, 2006).

A determinação da concentração de radônio com o uso de carvão ativado é baseada na propriedade de adsorção do gás nesse material. Quando comparados ao carvão ativado, os detectores de traços apresentam a vantagem de fornecer dados integrados durante um longo período de tempo (de alguns dias até um ano), com pouca influência das condições ambientais.

Nos materiais termoluminescentes, a radiação ao interagir com esses detectores cria um par elétron-buraco que permanece aprisionado no material termoluminescente; após aquecimento adequado, esses pares se recombinam levando a emissão de um fóton de luz. A partir da medida da intensidade da luz emitida é possível conhecer a quantidade de radiação de atingiu o detector (Knoll, 1989). Os detectores de traços mostram-se vantajosos em relação a este processo, pois podem registrar as partículas alfa emitidas pelo radônio com alta sensibilidade e são insensíveis às radiações beta e gama (NCRP-97).

Neste trabalho, foi aplicado o método de detecção passiva com detectores de traços nucleares do estado sólido, para a determinação da concentração de radônio no ar. Este método apresenta muitas vantagens, tais como: o baixo custo, a facilidade de manuseio, a alta sensibilidade, a simplicidade da técnica de contagem dos traços, a discriminação das partículas de acordo com

o tipo de ionização primária, a obtenção de dados integrados e a estabilidade em condições ambientais adversas.

3.2 Detectores de Traços Nucleares do Estado Sólido

Os detectores de traços nucleares do estado sólido, conhecidos como SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*) têm a propriedade de registrar os danos causados por partículas carregadas pesadas quando estas incidem sobre a sua superfície. Este registro se dá na forma de um traço latente, quando essas partículas depositam sua energia sobre a superfície do material, provocando um desarranjo em sua estrutura. Os traços produzidos têm diâmetro da ordem de 100 a 200 Angstrons e são invisíveis a olho nu (Enge, 1980). Para que possam ser observados é necessário revelá-los, o que pode ser feito ou com ataque químico ou com ataque eletroquímico. O tratamento químico corrói a superfície do detector, dissolvendo a camada superficial do material e tornando possível a observação do traço. A leitura dos traços pode ser feita num microscópio óptico ou numa câmara de faísca (quando a densidade de traços é bastante elevada), fornecendo informações sobre a radiação que o produziu.

O traço formado após o tratamento químico, visto de perfil, assemelha-se a um cone. Uma vez que a observação do traço é feita sobre a superfície do detector, a aparência do traço ao microscópio é semelhante a de um círculo ou uma elipse, dependendo do ângulo de incidência.

Em 1967 Geiger mediu a concentração de ^{222}Rn no ar com detectores de traços, utilizando nitrato de celulose. Desde então tem havido um grande interesse por parte da comunidade acadêmica nesta técnica, especialmente por ser um método de detecção simples e de baixo custo, o que acarretou num grande número de trabalhos sobre o assunto (NCRP-97, Enge, 1980, Durrani, 2001).

O método mais comumente usado na detecção passiva de ^{222}Rn com detectores de traços nucleares do estado sólido é baseado na utilização de câmaras de difusão (George, 1991, Paulo, 1991, Urban et al., 1985), que são recipientes permeáveis apenas ao radônio, ou seja, o ^{222}Rn consegue penetrar nesses recipientes, mas os seus filhos e os outros isótopos do gás (^{219}Rn e ^{220}Rn)

não. Utilizando-se uma membrana adequada (Mayya et al., 1998), é possível barrar os descendentes do ^{222}Rn e aproximadamente 99% do ^{220}Rn presente no ar ambiente, garantindo assim, que apenas o ^{222}Rn seja detectado. Na literatura estão relacionados alguns tipos de membrana que cumprem com sucesso esse objetivo (Fleischer, 1988, Mayya, 1998). No interior da câmara é colocado um detector de traços nucleares do estado sólido (SSNTD) que registra as partículas alfa emitidas pelo ^{222}Rn que penetrou na câmara e também as partículas alfa dos filhos do radônio que foram produzidos dentro da câmara pelo decaimento do ^{222}Rn . Por meio de um fator de calibração (Cherouati, 1988, Campos et al., 2002, Caccuri e Campos, 2007), pode-se estabelecer uma relação entre a quantidade de traços detectados e a concentração de ^{222}Rn no ambiente.

Existem muitos materiais detectores de traços conhecidos. Os mais comuns são: o nitrato de celulose (LR-115), os policarbonatos (MAKROFOL e LEXAN) e o allyldiglicol-carbonato (CR-39). Todos esses materiais são utilizados na dosimetria de radônio (Cesar e Franco, 1986, Cherouati et al., 1988) e são insensíveis às partículas beta e aos raios gama.

Neste trabalho o detector utilizado é o Makrofol E, um policarbonato produzido pela empresa alemã Bayer com uma espessura de 100 μm . Este detector possui uma face brilhante e outra opaca, sendo que os traços são registrados na face brilhante, chamada de face útil do detector. A escolha do Makrofol E como detector a ser utilizado nesse estudo, baseou-se na disponibilidade do mesmo no Laboratório de Radiometria Ambiental do Centro de Metrologia das Radiações do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

3.3 Determinação da concentração de ^{222}Rn no ar

A determinação da concentração de ^{222}Rn no galpão da Salvaguardas do *ipen* foi feita pelo método de detecção passiva utilizando-se câmaras de difusão do tipo KFK (Kernforschungszentrum Karlsruhe). No interior da cada câmara foi colocado um detector de traços nucleares do estado sólido tipo MAKROFOL E de 1 cm^2 . Na entrada da câmara foi colocado um filtro de fibra de vidro, para impedir a penetração do ^{220}Rn e dos filhos do ^{222}Rn , garantido assim que a densidade de traços obtida fosse relativa apenas ao radônio. Para o

filtro de fibra de vidro e as dimensões da câmara utilizada, a retenção de ^{220}Rn foi de 99,2% e a de ^{222}Rn apenas 2% (Campos et al., 2002, Alberigi, 2006).

Os detectores foram expostos ao ^{222}Rn presente no ar ambiente do galpão da Salvaguardas durante um período total de 21 meses, sendo trocados a cada três meses aproximadamente. Após a troca, os detectores foram encaminhados ao Laboratório de Radiometria Ambiental onde passaram por um ataque químico para posterior observação em um microscópio óptico.

Existem diferentes protocolos para a revelação dos detectores de traços e eles dependem do tipo de material utilizado. A solução deve ser ácida, para detectores inorgânicos e alcalina para detectores plásticos. No caso do Makrofol E a solução mais comumente utilizada é denominada PEW₄₀, composta por 15% de hidróxido de potássio, 40% de álcool etílico e 45% de água destilada (César e Franco, 1986). Neste trabalho a revelação dos detectores de traços nucleares do estado sólido foi feita com a solução PEW₄₀, durante 2 horas a uma temperatura constante de 70°C.

Uma vez revelados, os detectores foram observados num microscópio óptico para a obtenção da densidade de traços (traços/cm²). Cabe ressaltar que a densidade de traços utilizada no cálculo da concentração de ^{222}Rn refere-se ao valor líquido, ou seja, descontados os traços relativos à radiação de fundo e o procedimento para essa determinação será descrito na parte experimental. A partir do conhecimento da densidade de traços, do fator de calibração e do tempo de exposição foi calculada a concentração de radônio presente no ar ambiente do galpão da Salvaguardas do *ipen* por meio da seguinte expressão (Mayya, 1998):

$$C_{\text{Rn}} = \frac{D}{k \cdot t} \quad (3.1)$$

onde:

C_{Rn} - concentração de ^{222}Rn no ar (Bq·m³)

D - densidade de traços líquida (traços/cm²)

k - fator de calibração (traços/cm² por Bq/m³·d)

t - tempo de exposição (d)

3.4 Fator de calibração

Para o conhecimento da concentração de radônio no ar ambiente é necessário estabelecer um fator que relacione a densidade de traços na superfície do detector (traços/cm²) com a concentração do radionuclídeo em estudo no ar (Bq/m³). Para isso um detector de traços nucleares do estado sólido idêntico ao utilizado no galpão da Salvaguardas (MAKROFOL E de 1cm²) foi exposto a uma fonte de calibrada de ²²²Rn por meio do parêlho RN-150 da *Pylon Electronics Incorporation* (Pylon, 1992). Este aparelho contém uma fonte sólida calibrada de ²²⁶Ra de 3kBq de atividade e opera com uma bomba de vácuo, liberando uma quantidade conhecida de ²²²Rn para o recipiente que contém o detector a ser calibrado.

Após a exposição o detector passou pelo mesmo tratamento químico já descrito e pelo mesmo procedimento de leitura dos detectores expostos no local de estudo. A determinação do fator de calibração foi feita por meio da equação 3.2.

$$k = \frac{D}{C_{Rn} \cdot t} \quad (3.2)$$

onde :

k - fator de calibração (traços/cm² por Bq/m³·d)

D - densidade de traços (traços/cm²)

C_{Rn} - concentração conhecida de ²²²Rn (Bq/m³)

t - tempo de exposição (d)

3.5 Dose efetiva comprometida

O conhecimento do mecanismo de incorporação do radionuclídeo em estudo e de seus compostos, além do seu comportamento metabólico no corpo humano são requisitos necessários para a estimativa da dose de radiação recebida.

Os radionuclídeos podem ser incorporados por inalação, ingestão ou por meio da absorção pela pele ilesa ou ferida. A quantidade de radionuclídeos

incorporados por meio de inalação ou ingestão é definida com “intake” (ICRP-10, 1968).

A avaliação dos danos biológicos provocados pelas radiações ionizantes é feita por meio do conhecimento da dose de radiação recebida. A grandeza utilizada nesta avaliação é a dose efetiva comprometida.

Em 1978, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica estabeleceu um limite anual máximo permissível de dose efetiva (na época denominada de dose equivalente efetiva) para efeitos estocásticos (aqueles que não apresentam limiar de dose para o seu aparecimento e cuja probabilidade de ocorrência é função da dose recebida), de 50 mSv, para trabalhadores (ICRP-30, 1979). A estimativa dessa dose de radiação é baseada no homem referência, cujas características fisiológicas e anatômicas estão definidas na publicação 23 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP-23, 1975). A partir de 1990, a comissão recomendou que este limite passasse a ser de 100 mSv num período de 5 anos, o que corresponde a um limite anual de 20 mSv, sendo permitido um valor máximo de 50 mSv em qualquer ano isoladamente. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear passou a adotar esse limite de dose a partir do ano de 2005.

A inalação é a principal via de incorporação no caso de radionuclídeos gasosos como o radônio. Os compostos radioativos sólidos inalados na forma de aerossóis podem seguir uma série de caminhos dentro do organismo dependendo das suas propriedades físico-químicas. Uma parte do que é inalado é depositada no trato respiratório e daí transportada para outros órgãos e tecidos e o restante é exalado (ICRP-66, 1994).

A dose de radiação recebida pelos tecidos do trato respiratório devida à inalação do radônio, e de seus filhos não pode ser diretamente medida, a sua determinação deve ser feita por meio de modelos dosimétricos que avaliem a quantidade de material inalado e a deposição, retenção e eliminação deste material do trato respiratório.

A metodologia para o cálculo da dose devido à inalação de radônio pode ser feita de duas maneiras distintas, seguindo-se a abordagem da dosimetria física (a partir da medida da dose absorvida nas células do epitélio bronquial) ou da avaliação epidemiológica (a partir da avaliação do detrimento

sofrido pelos mineiros de ferro, carvão e urânio). A diferença no resultado da dose obtida adotando-se a abordagem dosimétrica ou a epidemiológica é de um fator de 2,5, o que é considerado satisfatório em termos de cálculo de dose, devido à complexidade das variáveis envolvidas (NORNC, 2000)

Neste trabalho, a dose efetiva comprometida pela inalação de radônio foi determinada seguindo-se os procedimentos da Comissão Internacional de Proteção Radiológica e adotando-se a abordagem epidemiológica, a partir da seguinte expressão:

$$E = C \times I \times t \times FCD \quad (3.3)$$

onde:

E - dose efetiva comprometida devido à inalação do radionuclídeo de interesse (mSv/a)

C - concentração do radionuclídeo de interesse (Bq/m³)

I - taxa anual de respiração média do homem referência (m³/h)

t - tempo de exposição (h/a)

FCD - fator de conversão de dose para a inalação do radionuclídeo de interesse (mSv/Bq)

4 PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Montagem das câmaras de difusão

Foram utilizadas as câmaras de difusão desenvolvidas no Centro de Pesquisas Nucleares de Karlsruhe, Alemanha (Urban, 1985) e, por isso, denominadas câmaras tipo KFK (Kernforschungszentrum Karlsruhe).

A câmara utilizada consiste em uma cúpula semi-esférica de 4 cm de diâmetro por 2 cm de altura, com uma tampa com fechamento em rosca e um anel para segurar o detector de traços (FIG. 4.1, 4.2 e 4.3).

Na entrada da câmara foi posicionado um filtro de fibra de vidro (Fleisher, 1988, Campos et. al, 2002) com a função de reter os filhos do ^{222}Rn e o ^{220}Rn presentes no ar ambiente.

FIGURA 4.1 – Câmara de difusão KFK aberta com detector Makrofol E e filtro de fibra de vidro

FIGURA 4.2 – Câmara de difusão KFK montada e aberta

FIGURA 4.3 – Câmara de difusão KFK montada

4.2 Colocação dos detectores no galpão da Salvaguardas do *ipen*

Foram escolhidos 14 pontos estratégicos (chamados de ilhas) ao longo do galpão e um ponto externo para a colocação dos detectores de traços. Em cada ilha foi fixada uma estaca e em cada estaca foram colocadas duas ou três câmaras de difusão, conforme a disponibilidade, contendo um detector de traços nucleares do estado sólido cada uma, a uma altura de 1,60 m do solo (FIG. 4.4 e 4.5). Os detectores de 1 cm² foram colocados no interior da câmara de difusão e expostos durante 3 meses quando foram substituídos por outros, na mesma configuração, até que se completasse o período total de monitoração de 21 meses.

FIGURA 4.4 – Vista interna do galpão da Salvaguardas com estacas que contêm as câmaras de difusão

FIGURA 4.5 – Vista das ilhas monitoradas com as estacas contendo as câmaras de difusão

A FIG. 4.6 apresenta um esquema com a distribuição dos 15 pontos de monitoração ao longo do galpão da Salvaguardas e o ponto externo, as estacas com os detectores foram distribuídas aleatoriamente entre os pontos de monitoração (ilhas) no local.

FIGURA 4.6 - Representação esquemática da distribuição dos pontos de monitoração no galpão da Salvaguardas.

4.3 Procedimento para a obtenção da densidade de traços

Após a exposição, os detectores foram trazidos ao Laboratório de Radiometria Ambiental onde foram revelados em banho-maria com uma solução química denominada PEW₄₀ (15% de hidróxido de potássio, 40% de álcool etílico e 45% de água destilada) a uma temperatura constante de 70°C (FIG. 4.7) durante 2 horas (Cesar e Franco, 1986). A seguir foram lavados com uma solução de ácido nítrico 2% e posteriormente com água destilada. Ao término desse procedimento, os detectores foram observados em um microscópio óptico (Microscope de Travail et de Recherche, Wild M20, Heerbrugg) (FIG. 4.8) para a determinação da densidade de traços (traços/cm²).

FIGURA 4.7 – Banho-maria Quimis com temperatura controlada para a revelação dos detectores de traços

FIGURA 4.8 – Microscópio óptico para a leitura dos detectores de traços revelados

Para otimizar o processo de leitura dos detectores de traço foi determinado um fator de leitura de traços, que corresponde ao número de faixas mostradas no campo ótico de 1 cm^2 do detector, seguindo-se a metodologia descrita em Aberigi et al. (2005). No caso da magnificação utilizada (40x), esse fator foi 26. A densidade de traços (traços/ cm^2) na superfície do detector (FIG. 4.9) foi determinada a partir da média de três faixas (central, esquerda e direita) multiplicada por esse fator.

FIGURA 4.9 – Traços na superfície do detector Makrofol E vistos no microscópio com a objetiva no aumento 40

4.4 Determinação da Radiação de Fundo

Para a determinação da radiação de fundo (*background*) dos detectores de traços nucleares do estado sólido (traços/cm²), fez-se a revelação de detectores não expostos, nas mesmas condições dos detectores utilizados no local de estudo e utilizou-se o mesmo procedimento de leitura. Deste modo foi possível determinar a quantidade de traços por unidade de área do detector a serem descontados da contagem de traços dos detectores que foram expostos.

Foram feitas medidas da radiação de fundo a cada troca dos detectores e o resultado médio obtido foi de 1500 ± 162 traços/cm². Cabe ressaltar que não foi descontado o valor médio de radiação de fundo no cálculo da concentração de ²²²Rn e sim a densidade de traços relativa à radiação de fundo obtida a cada período.

4.5 Determinação do fator de calibração

Para a determinação da concentração de radônio no ar é necessário estabelecer um fator que relacione a densidade de traços com a concentração de radônio (fator de calibração). Para tanto um detector de traços nucleares do estado sólido Makrofol E foi inserido numa célula de Lucas adaptada (FIG. 4.10 e 4.11) e exposto a uma concentração conhecida de ^{222}Rn por meio do aparelho RN-150 (FIG. 4.12, 4.13 e 4.14) da *Pylon Eletronics Incorporation* (Pylon Instruction Manual, 1992).

Este aparelho contém uma fonte sólida calibrada de ^{226}Ra de 3 kBq de atividade e opera com uma bomba de vácuo, produzindo concentrações conhecidas de ^{222}Rn de 15,2 kBq/m³. Após a exposição o detector passou pelo mesmo tratamento químico e procedimento de leitura já descritos.

FIGURA 4.10 – Célula de Lucas adaptada utilizada para a calibração dos detectores de traços nucleares do estado sólido

FIGURA 4.11 – Célula de Lucas adaptada aberta para a colocação do detector Makrofol E

FIGURA 4.12 – Vista frontal da fonte Pylon com a célula de Lucas adaptada

FIGURA 4.13 – Vista superior da fonte Pylon com a célula de Lucas adaptada

FIGURA 4.14 – Diagrama de funcionamento da fonte RN-150 da Pylon

Foram irradiados seis detectores de traços Makrofol E para a determinação do fator de calibração. Na TAB. 4.1 são apresentados os valores de cada fator de calibração com suas devidas incertezas, bem como o valor médio e o desvio padrão. Cabe ressaltar que esses valores concordam com os resultados obtidos em vários outros estudos (Mayya, 1998, Virk e Sharma, 2000, Amgarou et al., 2001, Campos et al., 2002, Alberigi, 2006).

TABELA 4.1 – Fatores de calibração obtidos e valor médio com desvio padrão.

Calibrações	Fator de calibração k (traço/cm ² por Bq/m ³ ·d).
1	0,020 ± 0,002
2	0,020 ± 0,002
3	0,029 ± 0,002
4	0,023 ± 0,002
5	0,029 ± 0,002
6	0,020 ± 0,002
Valor médio	0,023 ± 0,004

5 RESULTADOS e DISCUSSÃO

5.1 Concentração de ^{222}Rn galpão da Salvaguardas do *ipen*

Foram monitorados 15 pontos (14 internos e um externo) no galpão da Salvaguardas do *ipen* no período de dezembro de 2004 a setembro de 2006, totalizando 21 meses de monitoração. Durante o período de monitoração houve várias alterações nos materiais estocados no galpão e no seu posicionamento. A TAB. 5.1 apresenta a descrição e localização dos materiais nucleares durante o período de estudo. Os resultados das concentrações e suas devidas incertezas são apresentados na TAB. 5.2, dispostos por pontos de monitoração e por período. Vale ressaltar que os períodos coincidem com as estações do ano, para a observação de possíveis correlações sazonais.

TABELA 5.1 – Materiais presentes em cada um dos pontos de monitoração no galpão da Salvaguardas do *ipen*

Descrição dos materiais dispostos em cada um dos pontos de monitoração (ilhas)							
Ponto	Dez/04 – Mar/05	Mar/05 - Jun/05	Jun/05 - Set/05	Set/05 - Dez/05	Dez/05 - Mar/06	Mar/06 - Jun/06	Jun/06 - Set/06
1	retoter, UF ₄	retoter, sulfato de tório	Sulfato de tório, movimentação dos tambores	Sulfato de tório	retoter, sulfato de tório	Sulfato de tório, movimentação dos tambores	Sulfato de sódio
2	urânio DUA	urânio DUA, UF ₄	urânio DUA, UF ₄ , UO ₂	UF ₄ , UO ₂	urânio DUA, UF ₄ , UO ₂	Urânio, UF ₄ , UO ₂	UF ₄ , UO ₂
3	diuranato de amônia, UO ₂	diuranato de amônia, UO ₂ , DUS	diuranato de amônia, UO ₂ , pó de UF ₄	diuranato de amônia, UO ₂ , UF ₄	diuranato de amônia, UO ₂ , pó de UF ₄	diuranato de amônia, UO ₂ , pó de UF ₄	pó de UO ₂
4	pó de UO ₂	pó de UO ₂	pó de UO ₂	pó de UO ₂	pó de UO ₂	Hidróxido de tório	Movimentação dos tambores
5	movimentação dos tambores	movimentação dos tambores	hidróxido de tório	movimentação dos tambores; hidróxido de tório	movimentação dos tambores; hidróxido de tório	UF ₄ , diuranato de sódio	Movimentação dos tambores
6	rejeito DUS, diuranato de sódio	UF ₄ , rejeito DUS, diuranato de sódio	UF ₄ , diuranato de sódio, torta siliconada	Diuranato de sódio, torta siliconada	UF ₄ , rejeito DUS, diuranato de sódio	retoter (pasta), torta siliconada, pó de UO ₃	Diuranato de sódio, torta siliconada
7	retoter (pasta), torta siliconada	retoter UO ₃ (pó), torta siliconada	retoter UO ₃ (pó), torta siliconada	Retoter, UO ₃	retoter (pasta), torta siliconada	Mistura M2, UO ₂	retoter (pasta), pó de UO ₃
8	janela	janela	janela	janela	janela	janela	Janela
9	porta	porta	porta	porta	porta	porta	Porta
10	varetas de elementos combustíveis	varetas de combustíveis, cinzas UF ₆	varetas de combustíveis, UO ₂	varetas de combustíveis, cinzas UF ₆	varetas de elementos combustíveis	varetas de elementos combustíveis	Cinzas de UF ₆

TABELA 5.1 – Materiais presentes em cada um dos pontos de monitoração no galpão da Salvaguardas do *ipen*

11	rejeito DUS	rejeito DUS	Movimentação dos tambores	Diuranato de amônia	rejeito DUS em pasta	Movimentação dos tambores	Diuranato de amônia, mistura DUA
12	UO ₃	UO ₃	UO ₃	UO ₃ , movimentação das ilhas	UO ₃ , movimentação das ilhas	UO ₃ ,	UO ₃ , movimentação dos tambores
13	mistura M2	mistura M2	mistura M2, UO ₂	UO ₃ , UO ₂	Mistura M2, UF ₄	mistura M2, UO ₂	mistura M2, UO ₃ , UO ₂
14	escória de MgF ₂ , UF ₄ (sólido)	UF ₄ , urânio	Fluorita, movimentação dos tambores	Mistura M2, movimentação dos tambores	Fluorita, escória de MgF ₂ , movimentação dos tambores	Urânio, movimentação dos tambores	Mistura M2, movimentação dos tambores
15	sulfato de tório, urânio	UF ₄ , urânio	UF ₄ , urânio	Urânio	UF ₄ , urânio	UF ₄ , urânio	UF ₄ , urânio, UO ₂

Legenda:

Retoter: Resíduo de tório e terras raras (gerado na produção e purificação do nitrato de tório puro).

DUA: Diuranato de Amônia

DUS: Diuranato de Sódio

MgF₂: Fluoreto de Magnésio

UF₄: Tetrafluoreto de urânio

UF₆: Hexafluoreto de urânio

UO₃: trióxido de urânio

TABELA 5.2 – Concentração de ^{222}Rn no galpão da Salvaguardas do *ipen*

Pontos	Nº de Detectores	Concentração de ^{222}Rn (Bq/m ³)						
		Dez/04 Mar/05	Mar/05 Jun/05	Jun/05 Set/05	Set/05 Dez/05	Dez/05 Mar/06	Mar/06 Jun/06	Jun/06 Set/06
1	3	721 ± 25	316 ± 8	1588 ± 16	941 ± 9	1291 ± 51	922 ± 44	1316 ± 13
2	3	1020 ± 30	1682 ± 79	2048 ± 81	1797 ± 78	1592 ± 62	1949 ± 53	1609 ± 63
3	2	331 ± 18	461 ± 25	974 ± 49	1016 ± 76	942 ± 77	657 ± 86	1162 ± 97
4	2	951 ± 30	449 ± 25	1003 ± 41	1239 ± 28	1156 ± 34	932 ± 6	948 ± 23
5	2	526 ± 23	467 ± 17	875 ± 73	616 ± 28	1529 ± 60	1068 ± 47	1036 ± 20
6	2	767 ± 28	455 ± 34	1188 ± 24	196 ± 9	1205 ± 103	615 ± 19	874 ± 40
7	2	1123 ± 33	932 ± 8	1136 ± 65	1138 ± 191	808 ± 60	1465 ± 67	1238 ± 16
8	2	1616 ± 40	733 ± 85	1211 ± 57	1273 ± 249	790 ± 103	1346 ± 79	999 ± 29
9	2	1077 ± 33	376 ± 8	829 ± 41	447 ± 76	356 ± 43	801 ± 16	815 ± 57
10	2	1662 ± 40	255 ± 59	829 ± 24	948 ± 195	1016 ± 95	602 ± 9	995 ± 3
11	2	916 ± 30	189 ± 34	1119 ± 122	1030 ± 19	771 ± 43	1267 ± 86	884 ± 33
12	2	905 ± 30	648 ± 17	1217 ± 16	684 ± 86	295 ± 43	1083 ± 9	1033 ± 37
13	2	1375 ± 37	304 ± 59	1072 ± 90	887 ± 28	1511 ± 69	531 ± 19	1152 ± 3
14	2	1192 ± 34	455 ± 68	1356 ± 16	860 ± 143	649 ± 43	739 ± 19	1036 ± 13
15	2	1915 ± 43	672 ± 68	1101 ± 16	1050 ± 28	1395 ± 43	1314 ± 25	1029 ± 23

Nas FIG. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 e 5.15 são apresentadas as concentrações de ^{222}Rn durante todo o período de monitoração em cada uma dos pontos (ilhas) avaliados.

FIGURA 5.1 – Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 1

FIGURA 5.2 – Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 2

Figura 5.3 – Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 3

Figura 5.4 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 4

Figura 5.5 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 5

Figura 5.6 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 6

Figura 5.7 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 7

Figura 5.8 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 8

Figura 5.9 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 9

Figura 5.10 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 10

Figura 5.11 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 11

Figura 5.12 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 12

Figura 5.13 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 13

Figura 5.14 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 14

Figura 5.15 - Concentrações de ^{222}Rn no ponto de monitoração 15

Durante as monitorações foram observadas algumas mudanças na disposição dos tambores que contêm os materiais nucleares, o que acarretou em variações nas concentrações de ^{222}Rn ao longo do período estudado. Observou-se também, que essas variações não acompanhavam a tendência descrita na literatura, para a variação sazonal.

Nota-se no ponto 1, menor concentração de radônio no período de março a junho de 2005 devido a maior abertura do galpão. Já nos períodos subseqüentes houve um aumento de concentração devido ao aumento do material estocado.

No ponto 2, observa-se que no período de junho a setembro de 2005 houve um sensível aumento da concentração de ^{222}Rn , provavelmente causado pelo aumento de materiais contendo urânio encontrados nessa ilha e por ser o período de menor abertura do galpão de acordo com os registros de controle de acesso ao local.

Nos pontos 3 e 4, pequenas variações foram encontradas em cada ponto a partir do período de março a junho de 2005.

No ponto 5, até dezembro de 2005 não houve grandes oscilações nos valores de concentração, durante esse período apenas a posição dos tambores foi modificada. A partir desse período observou-se um aumento significativo na concentração devido à inclusão de novos materiais nessa ilha.

No ponto 6, com a mudança nos materiais nos períodos de junho a setembro em relação a setembro a dezembro de 2005 houve uma significativa diminuição na concentração de ^{222}Rn .

Assim como nos pontos 3 e 4, pouca variação foi observada no ponto 7 ao longo do período de estudo, a diferença é que neste último ponto os valores foram aproximadamente constantes durante todo o período e os outros pontos apresentaram variação nos dois primeiros trimestres da monitoração.

No ponto 8 (externo ao galpão), ao contrário do esperado, obteve-se valores relativamente elevados de concentração, supõe-se que esse fato deva-se basicamente a três fatores: a proximidade do detector em relação à parede externa do galpão e conseqüentemente à exalação de radônio do material de construção, a entrada de filhos do radônio na câmara de difusão, uma vez que esta ficava exposta ao tempo e o filtro de fibra muitas vezes apresentava danos e ao arraste do radônio na direção dos detectores no momento da abertura da porta principal (materiais) do galpão da Salvaguardas.

No ponto 9 (porta na sala de movimentação), observou-se que a partir do março de 2005, exceto nos períodos de férias, houve diminuição da concentração pelo fato das atividades serem realizadas sempre com a porta aberta, aumentando assim a ventilação.

No ponto 10 tem-se valor elevado de concentração no período de dezembro de 2004 a março de 2005. Após este período não houve grande variação, exceto entre março e junho de 2005 que se refere ao período de maior abertura do galpão.

No ponto 11, a partir de junho de 2005 não foram observadas variações significativas ao longo do período.

No ponto 12, destaca-se uma grande diminuição na concentração entre dezembro de 2005 e março de 2006, provavelmente causada pela movimentação dos tambores.

Nos pontos 13, 14 e 15 observa-se comportamento semelhante ao descrito nos pontos 10 e 11.

Cabe ressaltar que o período entre março a junho de 2005 foi o que apresentou menores concentrações de ^{222}Rn em todos os pontos estudados. Isto ocorreu principalmente pela grande frequência de abertura no galpão devido à atividade de colocação de novos tambores e troca dos já existentes, alterando toda a configuração existente no período inicial de estudo. Estes resultados confirmam a hipótese de que taxa de ventilação tem grande influência nos valores das concentrações de ^{222}Rn num ambiente.

5.2. Estimativa da dose efetiva comprometida

A dose efetiva comprometida para os indivíduos ocupacionalmente expostos no galpão da Salvaguardas do *ipen* foi calculada a partir dos procedimentos da Comissão Internacional de Proteção Radiológica utilizando-se a equação 3.3, apresentada no capítulo 3. Foram considerados dois tempos de exposição, um de 2000 h por ano (considerando-se o período normal de trabalho) e outro de 1500 h, relativo ao tempo em que um dos trabalhadores realizou atividades no galpão durante o período deste estudo. A informação sobre esse último período de trabalho foi obtida no livro de registro de abertura do galpão da Salvaguardas. Foi utilizado o valor da taxa anual de respiração do homem referência de $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$, um fator de conversão de dose de $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/Bq}$, considerando-se a abordagem epidemiológica (ICRP-65, 1993) e a média geométrica das concentrações de ^{222}Rn durante o período de monitoração. Os valores obtidos estão apresentados na TAB. 5.3.

TABELA 5.3: Dose efetiva comprometida (E) (mSv/a)

Local	E (mSv/a)	
	2000h	1500 h
Externo	6,6	4,9
Ante sala	3,7	2,8
Galpão (interno)	5,4	4,1

Para o ponto externo ao galpão (ponto colocado na janela) os resultados obtidos foram 4,9 e 6,6 mSv/a. Para o ponto localizado na ante sala os valores encontrados foram 2,9 e 3,7 mSv/a. Os valores de dose na parte interna do galpão foram 4,1 e 5,4 mSv/a. O fator de conversão de dose (FCD) leva em consideração a contribuição dos filhos do radônio de meia-vida curta por meio de um fator de equilíbrio de 0,4 entre o gás e seus filhos. Todos os valores de dose obtidos estão abaixo do limite anual de dose para trabalhadores que é 20 mSv/a (ICRP-60, 1990).

6. CONCLUSÕES

Foram observados valores elevados de concentração de ^{222}Rn ao longo do período estudado, a partir dos resultados obtidos e das informações sobre a rotina de atividades no galpão da Salvaguardas do *ipen*, conclui-se que as flutuações nos valores de concentração foram influenciadas principalmente, pela abertura das portas do galpão para a execução de atividades pelos trabalhadores, pelo período de férias dos funcionários e pelas trocas dos materiais nas ilhas estudadas.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica estabeleceu que para ambientes de trabalhos subterrâneos a concentração de ^{222}Rn não deve ultrapassar o valor médio de 1000 Bq/m^3 (ICRP-65, 1993), denominado nível de ação. No caso do galpão da Salvaguardas, embora não se trate de um ambiente subterrâneo, é possível encontrar níveis de concentração acima do nível de ação devido à presença de grandes quantidades de materiais contendo urânio no local, além da ventilação pobre nos períodos em que o galpão permanece fechado. Os resultados obtidos mostram a importância deste trabalho e a necessidade de constante monitoração no local.

A estimativa da dose pela inalação do ^{222}Rn foi feita levando-se em consideração duas situações. Na primeira foram consideradas 1500 horas de exposição (relativas a um dos trabalhadores exposto durante o período de realização deste trabalho), com base nos registros de abertura do galpão (1500 h). Numa segunda análise levou-se em consideração o valor referência de 2000 horas.

Em ambos os casos o limite anual de dose para trabalhadores não foi atingido, contudo, devido aos valores elevados de concentração obtidos, sugere-se a constante monitoração dos níveis de radônio no galpão da Salvaguardas do *ipen*. Ressalta-se ainda que os trabalhadores do galpão não estão expostos apenas ao radônio, mas também aos emissores gama presentes nos materiais nucleares que provocam exposição externa aos trabalhadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERIGI, S. **Avaliação da exposição ao ^{222}Rn nas cavernas do parque Estadual do Alto Ribeira (PETAR)**. 2006. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., CAMPOS, M.P., Radon concentrations in caves of Estadual Turístico do Alto Ribeira (Petar), SP, Brazil: Preliminary results, **International Congress Series**, Elsevier, v. 1276, p.403-404, 2005.

ALBERIGI, S., PECEQUILO, B.R.S., CAMPOS, M.P., **Um método alternativo para contagem de traços em detectores sólidos de traços nucleares**. In: International Nuclear Atlantic Conference, VII ENAN, Santos, setembro, 2005.

AL-KOFAHI, M.M., KHADER, B.R., LEHLOOH, A.D., KULLAB, M.K., ABUMURAD, K.M. Measurement of radon 222 in Jordanian dwellings. **Nucl. Tracks Radiat. Meas.**, v. 20, n. 2, p. 377-382, 1992

AMGAROU, K. , FONT, LI., ALBARRACÍN, D., DOMINGO, C., FERNÁNDEZ, F., BAIXERA, C., Semi-automatic evaluation system for nuclear track detectors applied to radon measurements. **Radiat. Meas.**, v.33, p.203-209, 2001

BAYER MATERIAL SCIENCE, Plastic technologic Center, disponível em: www.bayer.com.br. Acesso em 19/04/2005.

SAUEIA, L.C., CAMPOS, M.P. Radon levels at NORM storage site. In: 5th International Symposium on NORM, p1-3, Sevilha, 2007.

CAMPOS, M.P., **Avaliação do impacto radiológico provocado por materiais de construção em moradores de casa populares**. 1994. Dissertação (mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

CAMPOS, M.P., PECEQUILO, B.R.S. **Avaliação da dose por inalação de radônio em moradores de casas populares**. In: Anais da XVII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil, Angra dos Reis, RJ, p.23-24, 1994

CAMPOS, M.P., PECEQUILO, B.R.S. Exposure assessment due to building materials in ordinary houses at São Paulo, Brazil. **Rev. Bras. Pesq. Des.**, v.5, n.2, p.60-65, 2003.

CAMPOS, M.P., PECEQUILO, B.R.S. Thoron exposure for workers with naturally occurring radioactive materials. **Int. J. Low Radiation**, v. 4, n.2, p.53-60, 2007.

CAMPOS, M.P., PECEQUILO, B.R.S., MAZZILLI, B.P., **Assessment of radon exposure at Termas de Araxá spa, Brazil using Makrofol E detector**, In: International Conference on radioactivity in the environment, p193-196, Monaco, 2002

CESAR, M.F., FRANCO, M.A.R. Some studies on the registration of particles on MAKROFOL E. **Nuclear Tracks**, v. 12, n. 1-6, p. 193-196, 1986.

CHEROUATI, D.E., DJEFFAL, S., DURRANI, S.A. Calibration factor for LR-115 detectors used for the measurement of alpha activity from radon. **Nucl. Tracks Radiat. Meas.**, v.15, n. 1-4, p. 583-586, 1988.

Da SILVA, A. A. R. **Radônio e filhos em residências da cidade de São Paulo**. 2005. Tese (doutorado) – Instituto de Física – Universidade de São Paulo.

DURRANI, S.A. Nuclear Tracks: a success history of the 20th century. **Radiat. Meas.**, v. 34, p.5-13, 2001.

EISENBUD, M., **Environmental Radioactivity**. 2nd ed. Academic Press, Orlando, 1987

ENGE, W. Introduction to plastic nuclear track detectors. **Nucl. Tracks**, v. 4, n. 4, p.283-308, 1980.

FLEISCHER, R.L. Radon in the environment – opportunities and hazards. **Nucl. Track Radiat. Meas.**, v. 14, n.4, p.421-435, 1988.

GEORGE, A.C. An overview of instrumentation for measuring environmental radon and radon progeny. **IEEE Transitions of Nuclear Science**, v. 37, n. 2, p. 892-901, 1991.

HIPKIN, J., PAYNTER, R.A., SHAW, P.V. Exposures at Work to Ionising Radiation Due to the Use of Naturally Occurring Radioactive Materials in Industrial Processes. **Appl. Radiat. Isto.** 49(3), 149-168, 1998.

ICRP-10. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Report of the Committee IV on evaluation of radiation doses to body tissues from internal contamination due to occupational exposure**. Pergamon Press. Londres, 1968. (ICRP-10).

ICRP-23. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Report of the task group on reference man**. Pergamon Press. Oxford, 1975.

ICRP-32. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Limits for inhalation of radon daughters by workers**. Pergamon Press. Oxford, 1981.

ICRP-60. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Recommendations against radon-222 at home and at work**, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 60, 1990. Pergamon Press. Oxford, 1987.

ICRP 65 – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Protection against radon-222 at home and at work**, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 65, 1993.

ICRP-66 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Human respiratory tract model for radiological protection**, Oxford, Pergamon Press: ICRP Publication 66, 1994 b

KATHREN, R.L. NORM Sources and Their Origins. **Appl. Radiat. Isto.** 49(3), 149-168, 1998.

KNOLL, G., F., **Radiation Detection and Measurement**, 2nd ed., Nova York, 1979.

MAYYA, Y.S., EAPPEN, K.P., NAMBI, K.S.V. Methodology for mixed field inhalation dosimetry in monazite areas using a twin-cup dosimeter with three track detectors. **Rad. Prot. Dosim.**, v. 77, n. 3, p.177-184, 1998.

MISDAQ, M.A., AMGHAR, A. Radon and thoron emanation from various marble materials: impact on the workers. **Radiat. Meas.**, v. 39, p.421-430, 2005.

NCRP-45. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Natural background radiation in the United States**. Nov. 15, 1975.

NCRP-97. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **Measurement of radon and radon daughter in air**. Nov. 15, 1988.

NIKEZIC, D., UROSEVIC, V. A theoretical study of radon measurements with activated charcoal. **Nucl. Inst. Met. Phys. Res.**, n° 406, p.486-498, 1998.

NORNC. Naturally Occurring Radioactivity in the Nordic Countries – Recommendations, 2000.

ORLANDO, C., ORLANDO, P., PATRIZII, L., TOMMASINO, L., TONNARINI, S., TREVISIL, R., VIOLA, P. A passive radon dosimeter suitable for workplaces. **Rad. Prot. Dosim.**, v. 102, n. 2, p.163-167, 2002.

PAULO, S.R. **Dosimetria ambiental de Rn-222 e filhos: Medida da eficiência absoluta do CR-39 levando-se em conta os efeitos do plate-out e fatores ambientais.** Campinas:1991. Tese (Doutorado) – Universidade de Campinas.

PYLON ELECTRONICS INCORPORATION Pylon model RN-150 **Manual Instruction**, 1992

PECEQUILO, B.R.S., comunicação pessoal, 2004.

PORSTENDORFER, J. **Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air.** In: Proc. FIFTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE NATURAL RADIATION ENVIRONMENT, 1993, Luxembourg, Bélgica, p. 44-46, 1993

SCINTREX. Operation manual RDA-200.

SOHRABI, M. The state-of-the-art on worldwide studies in some environments with elevated naturally occurring radioactive materials (NORM). **Appl. Radiat. Isot.**, v. 49, n. 3, p.169-188, 1998.

SOUSA, W.O., FREITAS, A.C., LIPSTEIN, J.L. Determinação da concentração de ^{222}Rn em trabalhadores ocupacionalmente expostos na mineradora Catalão. . In: International Nuclear Atlantic Conference, VII ENAN, Santos, setembro, 2005.

TUREK, K., GELEV, M., DIMOV, I. Comparative measurements of soil gas radon concentration using thermoluminescent and track detectors. **Radiat. Meas.**, v. 38, p.843-846, 2004.

UNSCEAR. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. New York, U.N., 1993.

UNSCEAR. United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation. New York, U.N., 2000.

URBAN, M., BINNS, D.A.C., ESTRADA, J.J. Radon measurements in mines and dwellings. Karlsruhe, Alemanha, Hauptabteilung Sicherheit. Jan, 1985 (KfK 3866).

VIRK, H.S., SHARMA, N. Indoor radon/thoron survey report from Hamirpur and Una districts, Himachal Pradesh, India. **Appl. Rad. Isot.** 52, p.137-141, 2000.

YAGINUMA, L.T. **Desenvolvimento dos métodos de medida do radônio em ambientes fechados.** 1993. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.