INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Dosimetria de Rn-222 no ar em ambientes localizados acima e abaixo do nível do solo

CAMILA DIAS CAZULA

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

Orientador:

Dra. Barbara Paci Mazzilli

SÃO PAULO

2015

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DOSIMETRIA DE RN-222 NO AR EM AMBIENTES LOCALIZADOS ACIMA E ABAIXO DO
NÍVEL DO SOLO**

CAMILA DIAS CAZULA

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

Orientador:

Dr. Barbara Paci Mazzilli

**Versão corrigida
Versão original disponível no IPEN**

**SÃO PAULO
2015**

Dedico a minha mãe, com toda minha gratidão.

Agradecimentos

A minha família, em especial a minha mãe e meus avós, pelo apoio e incentivo na realização das minhas conquistas;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, pela oportunidade de realizar este trabalho;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo oferecimento da bolsa de mestrado (Processo: 13/01841-9);

A Dra. Barbara Paci Mazzili, por me aceitar como aluna. Pela orientação, e acima de tudo pela prontidão e compreensão em todos os momentos que lhe procurei.

À Dra. Márcia Pires de Campos, pela orientação desde a iniciação científica. Pela importância na realização de trabalho e nos conhecimentos transmitidos.

Ao meu digníssimo professor Dr Marcelo Francis Maduar, pelas sugestões dadas desde o exame de capacidade e pelas conversas agradáveis.

Ao Dr Nivaldo Carlos da Silva, por aceitar participar da banca de defesa e nas sugestões dadas.

Ao colega Msc Fabio H. Mannoche, na prontidão e auxílio na instalação das câmaras e das demais tarefas que acompanham o trabalho com detectores de traços.

Ao Ronie da Silva, meu grande amigo e parceiro. Muito obrigada pelo apoio incondicional de sempre, por ser presente nessa reta final.

A minha mera “conhecida” Alice Alves, parceira nessa jornada. Obrigada pelas inúmeras e longas conversas, pela companhia nas disciplinas, por compartilhar as inseguranças, felicidades e conquistas.

À Msc Fernanda Cavalcante, simplesmente por ser a “Fê”. Muito obrigada pelas palavras de encorajamento e incentivo constante. Na minha lista de exceções você é uma “boazinha” que eu amo!

Ao Luiz Flávio e Carolina Fernanda, pela amizade e momentos de descontração. Parafraseando Mario Quintana; *“Há 2 espécies de chatos: os chatos propriamente*

ditos e ... os amigos, que são os nossos chatos prediletos”. Obs: Carol, você não é tão chata quanto o Luiz!

Às amigas de iniciação científica, Gabriela Lustoza e Nívia Figueiredo, pelas brincadeiras, risadas, por tornar agradáveis quaisquer atividades nos laboratórios. Sucesso a nós, meninas!

A Maria José De Oliveira, colega de sala. Obrigada por todo apoio e preocupação, por sempre me ouvir e pela sabedoria nos conselhos dados.

Ao Msc. Paulo Rene Nogueira, Tio Paulo. Pelas conversas, sempre tornando os dias mais agradáveis.

Ao professor Dr Daniel Francisco Palacios Fernandez, pela simpatia e conhecimentos transmitidos na disciplina da pós-graduação do IFUSP, dedicada a detectores de traços nucleares.

Ao Msc. Reginaldo De Aquino, pelas discussões sobre radônio. Pela prontidão em sempre me ajudar.

Aos amigos da radiologia, Cesar Dantas, André Luiz, Sergio de Sá, pelo encorajamento de sempre.

A todos que de alguma maneira colaboraram para a execução deste trabalho.

*"Não vale a pena viver sonhando,
e se esquecer de viver"*

(J. K. Rowling - Harry Potter e a pedra filosofal)

*"São nossas escolhas que revelam o que
realmente somos, muito mais do que
as nossas qualidades."*

(J. K. Rowling - Harry Potter e a Câmara Secreta)

*"As consequências dos nossos atos são sempre
tão complexas, tão diversas, que prever
o futuro é uma tarefa realmente difícil"*

(J. K. Rowling - Harry Potter e o Prisioneiro de Azkaban)

*"Embora venhamos de lugares diferentes e falamos línguas
diferentes nossos corações batem como um só"*

(J. K. Rowling - Harry Potter e o Cálice de Fogo)

*"Todos temos luz e trevas dentro de nós. o que nos define
é o lado com o qual escolhemos agir."*

(J. K. Rowling - Harry Potter e a Ordem da Fênix)

*"Cada qual acredita que o que tem a dizer é muito
mais importante do que qualquer coisa que
o outro tenha a contribuir!"*

(J. K. Rowling - Harry Potter e o Enigma do Príncipe)

*"Palavras são, na minha nem tão humilde opinião,
nossa inesgotável fonte de magia,
capazes de ferir e de curar!"*

(J. K. Rowling - Harry Potter e as Relíquias da Morte)

DOSIMETRIA DE Rn-222 NO AR EM AMBIENTES LOCALIZADOS ACIMA E ABAIXO DO NÍVEL DO SOLO

CAMILA DIAS CAZULA

Resumo

A exposição da população em geral à radiação ionizante surge principalmente a partir de fontes naturais. A principal contribuição é decorrente da inalação do radônio (Rn-222), um gás que ocorre naturalmente (UNSCEAR, 2000). A concentração de Rn-222 num ambiente é controlada por fatores como a permeabilidade do solo e teor de água, a variabilidade meteorológica, características de construção da fundação e da pressão diferencial positivo habitual entre o solo e o ambiente interno. Estudos indicam que a concentração de radônio, apresenta uma variação significativa no subsolo, térreo e andares superiores das edificações. O objetivo deste estudo é determinar os níveis de radônio, nos subsolos, térreos e andares acima do nível do solo, em uma universidade na cidade de São Paulo e um edifício residencial na cidade de Peruíbe. As medidas de Rn-222 foram realizadas através do método passivo com detectores de traços nucleares de estado sólido (CR-39). Os ambientes estudados apresentam concentrações de Rn-222 bastante inferiores aos valores recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, publicados no documento de 2009, de 300 Bq/m^3 para residências e 1000 Bq/m^3 para locais de trabalho. No edifício residencial na cidade de Peruíbe, analisaram-se ainda, as concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 em materiais de construção utilizados na construção do edifício, por meio de espectrometria gama. A dose efetiva total para o morador devido à exposição externa foi de $0,8 \text{ mSv a}^{-1}$, inferior ao limite de dose anual para público em geral de 1 mSv a^{-1} .

DOSIMETRY OF Rn-222 IN THE AIR IN ENVIRONMENTS LOCATED ABOVE AND BELOW GROUND LEVEL

CAMILA DIAS CAZULA

Abstract

Exposure of the general population to ionizing radiation comes mainly from natural sources. The main contribution is due to inhalation of radon (Rn-222), a gas that occurs naturally (UNSCEAR, 2000). The Rn-222 concentration in the environment is controlled by factors such as soil permeability and water content, the weather variability, materials used in the foundation and the usual positive pressure differential between the soil and the internal environment. Studies indicate that the concentration of radon shows a wide variation in the basement, ground floor and upper floors of buildings. The objective of this study is to determine radon levels in basements, ground floor and floors above ground level, at a university in the city of São Paulo and in one residential building in the city of Peruíbe. Rn-222 measurements were performed using the method with nuclear track of solid state detectors (CR-39). The studied environments present Rn-222 concentration well below the values recommended by the International Commission on Radiological Protection, published in the 2009 document, of 300 Bq/m³ for homes and 1000 Bq/m³ for the workplace. In the residential building, the concentration of Ra-226, Th-232 and K-40 in the materials used in the building construction was also analyzed, by gamma spectrometry. The effective total dose for the resident due to external exposure was 0.8 mSv y⁻¹, lower than the annual dose limit for the general public of 1 mSv y⁻¹.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Radônio	13
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivos específicos	18
3. METODOLOGIA	19
3.1 Detecção de Rn-222 no ar	19
3.1.1 Determinação da concentração de Rn-222 no ar com detectores sólidos de traços nucleares	21
3.2 Determinação da concentração de radionuclídeos emissores gama nos materiais de construção	24
3.2.1 Índices radiológicos	25
3.3 Determinação da exalação de Rn-222 no solo e nos materiais de construção pelos modelos propostos pela UNSCEAR	27
4 . PARTE EXPERIMENTAL	31
4.1. Área de estudo	31
4.2 Montagem das câmaras de difusão	31
4.3 Determinação dos níveis gama de Ra-226, Th-232 e K-40 no solo e nos materiais de construção	38
4.4 Densidade real e porosidade total	39
5. RESULTADOS	40
5.1 Concentração de Rn-222 nos edifícios	40
5.2 Níveis de Ra-226, Th-232 e K-40 nas amostras de materiais de construção	48
5.3 Taxa de exalação de Rn-222 no solo	50
5.4 Taxa de exalação de Rn-222 nos materiais de construção	51
5.5 Dose efetiva devido à inalação de Rn-222	54
5.6 Estimativa da Dose efetiva total	56
6. CONCLUSÃO	59
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

As fontes naturais de radiação são reconhecidamente a principal causa de exposição da população à radiação ionizante. Uma característica bastante peculiar da irradiação advinda de fontes naturais é que ela atinge toda a população mundial a uma taxa relativamente constante durante um longo período de tempo (UNSCEAR, 1988).

Os radionuclídeos naturais são divididos em primordiais, de meia-vida muito longa, e cosmogênicos, que são produzidos pela interação da radiação cósmica com átomos-alvo na atmosfera. Os radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre podem ser classificados em radionuclídeos que compõem as séries radioativas do U-238, Th-232 e do U-235 (FIG.1.1) e que decaem para isótopos estáveis do chumbo e radionuclídeos naturais, como o K-40, que decaem diretamente para um nuclídeo estável.

Dentre as séries radioativas naturais, as que despertam maior interesse em termos de proteção radiológica são as do Th-232 e do U-238, devido à abundância isotópica desses radionuclídeos, que é superior a 99%. O U-235 constitui somente 0,7% do urânio natural e a sua contribuição à exposição da população é considerada desprezível.

Os radionuclídeos primordiais e a radiação cósmica são então as principais fontes contribuintes para a exposição à radiação natural a qual os seres vivos estão sujeitos. Tanto a exposição externa quanto a interna são decorrentes destas fontes naturais (TAB 1.1).

A exposição externa é decorrente da radiação cósmica e da radiação gama emitida pelos radionuclídeos U-238 e Th-232 e seus descendentes e pelo K-40. A

exposição interna surge a partir da inalação e ingestão de elementos radioativos naturais presentes no ar e na dieta alimentar (UNSCEAR, 2000).

Figura 1.1: Séries radioativas (NCRP-94, 1987)

Tabela 1.1: Dose efetiva média anual partir de fontes naturais (UNSCEAR, 2000)

Fonte	Dose efetiva média anual (mSv)	Intervalo típico
Exposição externa		
Radiação cósmica	0,4	0,3 – 1,0
Radionuclídeos primordiais	0,5	0,3 - 0,6
Exposição interna		
Inalação (principalmente o Rn-222)	1,2	0,2 - 10
Ingestão	0,3	0,2 – 0,8
Total	2,4	1 - 10

A exposição interna é a principal contribuinte para a dose média anual de 2,4 mSv à qual os seres vivos estão sujeitos. Metade dessa dose é decorrente do Rn-222, membro da série do U-238. O Rn-222 é um gás nobre, formado a partir do decaimento alfa do Ra-226 e possui a capacidade de se difundir através do solo e dos materiais de construção, exalando para o interior dos ambientes (Maduar et al., 2011).

1.1 Radônio

Existem três isótopos naturais do radônio no meio ambiente: o Rn-222 membro da série do U-238, o Rn-220 da série do Th-232 e o Rn-219 da série do U-235. Nos estudos epidemiológicos para proteção dos indivíduos à radiação natural, o Rn-222 é o principal isótopo estudado. Essa atenção é devido a sua meia vida de 3,8 dias, que é relativamente longa quando comparada a dos outros isótopos que possuem meia vida considerada desprezível, 55,6 segundos para o Rn-220 e 3,19 segundos para o Rn-219.

O Rn-222 é um gás inerte e não interage diretamente com o trato respiratório. Os danos devidos à sua inalação são, na realidade, causados pelos seus descendentes de meia-vida curta, os radioisótopos Po-214, Pb-214, Bi-214 e Po-214 (TAB 1.2), metais pesados que sozinhos ou agregados a outras partículas

podem se depositar nos pulmões (Porstendorfer, 1993), decaindo por emissão de partículas alfa e beta e raios gama.

Tabela 1.2: Característica radioativas dos descendentes do Rn-222

Características	Radionuclídeo					
	Po-218	Pb-214		Bi-214		Po-214
Tipo de emissão	α	β	γ	β	γ	α
Energia (MeV)	6,00	1,03	0,29	3,26	0,61	7,69
Meia vida	3,05 min	26,8 min		19,7 min		164 μ s

A estimativa dos danos à saúde devidos à inalação de Rn-222 vem sendo extensivamente estudada, sendo os mineiros a principal fonte de informações sobre a relação entre inalação de radônio e casos de câncer de pulmão (ICRP-32, 1981). A Agência Internacional para Pesquisa sobre o Câncer (IARC), entidade da Organização Mundial de Saúde, classifica o Rn-222 na classe I. Para inclusão neste grupo (o mais alto na escala), o agente deve ter alta probabilidade cancerígena em humanos (IARC, 1998).

Materiais de construção, o solo abaixo da construção, a água e o gás natural, são as principais rotas de entrada do Rn-222 em um edifício (FIG 1.2) (IAEA, 2013).

- A** – Entrada de Rn-222 a partir do solo
- B** – Exalação de Rn-222 a partir dos materiais de construção
- C** – Entrada de Rn-222 pelo ar exterior
- D** – Rn-222 liberado a partir da água

Figura 1.2: Rotas de entrada no Rn-222 numa construção (Subilis,2003)

O nível de radônio em um ambiente depende principalmente da exalação do gás pelo solo e pelos materiais de construção e também das condições de ventilação do local (Costa, 2011; Campos, 1994).

A concentração dos radionuclídeos naturais nos materiais de construção varia para cada material, dependendo de fatores ligados ao processo de fabricação e matéria prima utilizada. Uma vez que os materiais de construção são derivados de rochas e solos, apresentam concentrações de radionuclídeos naturais, principalmente das séries radioativas do U-238 e Th-232 e o isótopo radioativo K-40, emissores de radiação gama, alfa e beta. Assim, os materiais de construção são uma fonte de exposição gama para os moradores das residências. Além disso, existe também o risco devido ao Rn-222, filho do Ra-226, radionuclídeo presente na série do U-238 (Campos, 1994).

Sabe-se que a taxa de ventilação é um dos fatores que contribuem fortemente para a variação da concentração de Rn-222 em um ambiente. Geralmente, a avaliação da exposição ao radônio em ambientes fechados é feita em residências localizadas acima do nível do solo. Entretanto, há construções, especialmente as utilizadas como locais de trabalho, por exemplo, escritórios, hospitais e escolas em que os ambientes estão localizados no subsolo, nas quais a

ventilação é menor e os níveis de radônio podem ser significativos. Esse fato mostra a importância de se monitorar as concentrações de radônio também nesses locais.

A medição dos níveis de Rn-222 nos ambientes localizados no subsolo se justifica também pela análise da dinâmica das rotas de entrada de Rn-222 nos edifícios. Pressupondo que o solo é o maior contribuinte para a concentração de Rn-222 (AIEA, 2013), entende-se que os ambientes, que estão distantes do solo, ou seja os andares superiores de um edifício, tenham concentrações menores de Rn-222. Espera-se, por exemplo, que os materiais de construção contribuam mais com a concentração de Rn-222 no segundo andar de um edifício do que o solo sobre o qual este edifício foi construído. Em contrapartida, o solo deverá ter maior influência na concentração de Rn-222 no subsolo do edifício, quando comparado ao ambiente térreo (Jonassen, 1993).

Estudos sobre os níveis de Rn-222 em diferentes pavimentos de edifícios utilizados como escolas, escritórios, residências e prédios públicos vêm sendo realizados em várias partes do mundo (Li et al., 2006; Papachristodoulou et al., 2010; Sánchez et al., 2012; Trevisi et al., 2012).

Construções subterrâneas são defendidas como uma alternativa para melhoria da qualidade de vida dos habitantes das grandes metrópoles com alta densidade demográfica (Durmisevic, 1998; Li et al., 2006). Essas construções são dadas como alternativa para ambientes usados como restaurantes, bibliotecas, academias e estacionamentos, diminuindo a circulação de pessoas na superfície. Tal condição leva a necessidade de se monitorar as concentrações de Rn-222, em locais subterrâneos de convívio humano.

Dados de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam o estado de São Paulo como o mais populoso do Brasil, com uma alta densidade demográfica, 166,23 (hab/km²). Ainda de acordo com o Relatório Perspectivas Mundiais de Urbanização - Revisão de 2011 da Organização das Nações Unidas (ONU), a cidade de São Paulo ocupa com mais de 19 milhões de habitantes, a sexta região urbana mais populosa do mundo.

O número de medidas da concentração de Rn-222 no ar em ambientes de convívio humano no estado de São Paulo vem crescendo nos últimos anos, porém são escassos, assim, estudos adicionais colaboram para se estabelecer um panorama dos níveis de radônio no estado. Na figura 1.3 é possível observar dados de literatura sobre a concentração do Rn-222 no ar em ambientes, no estado de São Paulo.

Figura 1.3: Concentrações de Rn-222 no estado de São Paulo (arquivo pessoal)

2. OBJETIVOS

Pretende-se com este trabalho de pesquisa determinar os níveis de radônio no ar em ambientes localizados acima e abaixo do nível do solo, mais especificamente nas salas de aula, biblioteca e laboratórios didáticos em uma Universidade (privada) na cidade de São Paulo e também em um edifício residencial localizado na cidade de Peruíbe, estado de São Paulo. Serão avaliadas as doses recebidas pelos indivíduos que frequentam esses locais, discentes e funcionários da universidade e moradores do edifício residencial. Pretende-se também avaliar a exalação de Rn-222 do solo de Peruíbe abaixo do edifício residencial e deste modo estimar a contribuição do radônio vindo do solo para a concentração nos ambientes internos e por fim, avaliar a exposição externa para os moradores do edifício residencial em Peruíbe a partir da determinação dos níveis de radiação gama presente nos materiais utilizados na construção.

2.1 Objetivos específicos

Determinar a concentração de Rn-222 no ar foi por meio da técnica de detecção passiva com detectores de traços nucleares do tipo CR-39. A partir dos resultados obtidos estimar a dose efetiva de acordo com as recomendações da UNSCEAR (2000).

Determinar os níveis de Ra-226, Th-232 e K-40, nas amostras de material de construção, do edifício residencial em Peruíbe, por meio de espectrometria gama, e assim avaliar a dose efetiva devido à exposição externa por esses materiais.

Aplicar as recomendações para determinação da taxa de exalação de Rn-222 no solo, a partir do modelo teórico da UNSCEAR (2000) em amostras de solo do edifício residencial na cidade de Peruíbe e avaliar sua possível contribuição, para os níveis de Rn-222 nos locais.

3. METODOLOGIA

3.1 Detecção de Rn-222 no ar

Existem vários métodos para se medir a concentração de radônio no ar (NCRP-97, 1988); esses métodos podem ser agrupados em duas técnicas básicas: detecção ativa e detecção passiva. Na técnica de detecção ativa, por meio de bombeamento, uma amostra de vários litros de ar do ambiente a ser estudado é coletada em um filtro e este é então medido. Na técnica de detecção passiva não existe um processo de coleta de ar, os detectores são simplesmente expostos ao ar ambiente (Paulo, 1991).

A escolha do método de medida é baseada no tipo de informações necessárias, nas características do local monitorado, no tempo de amostragem e na sensibilidade dos instrumentos.

A medida passiva da concentração de Rn-222 no ar pode ser feita com o uso de carvão ativado ou de detectores sólidos de traços nucleares.

O carvão ativado adsorve o Rn-222 presente no ar ambiente e por meio da medida do carvão em um detector de germânio hiperpuro, após o equilíbrio radioativo entre radionuclídeo pai e seus descendentes de meia-vida curta, é possível obter-se, por espectrometria gama as concentrações de Pb-214 e Bi-214 e posteriormente a concentração de Rn-222. Esse tipo de medida é aplicável para monitorações de curta duração (aproximadamente cinco dias).

Os detectores de traços têm sido predominantemente utilizados na determinação da concentração de Rn-222 no ar em virtude do custo relativamente baixo, da simplicidade no uso, da pequena geometria e por apresentarem a vantagem de fornecer dados integrados (de alguns dias até um ano, dependendo do

nível de concentração no local) com pouca dependência das condições ambientais (Durani, 2008). Além de atender as recomendações da OMS, IAEA e ICRP para monitorações a longo prazo.

No método de detecção com detectores sólidos de traços nucleares, quando uma partícula pesada incide sobre a superfície do detector, provoca um desarranjo em sua estrutura molecular formando um traço, o qual se estende por vários micrometros dependendo da energia da partícula incidente, o traço produzido tem um diâmetro da ordem de 100 a 200 Angstroms. Para que os traços possam ser observados é necessário aumentá-los, o que se consegue revelando-os com ataque químico ou eletroquímico.

O tratamento químico corrói a superfície do detector, dissolvendo a camada superficial do material detector com certa velocidade de ataque. O traço latente torna-se observável num microscópio óptico ou numa câmara de faísca (quando a densidade de traços é demasiadamente grande), fornecendo informações sobre a partícula que o produziu (Enge, 1980).

A análise do detector, por meio de microscopia ótica é realizada por métodos quantitativos, em que a determinação da quantidade de traços por unidade de área do detector fornece a densidade de traços (traços cm^{-2}) (Moraes, 1982), parâmetro proporcional a concentração de Rn-222.

A partir da década de 60, foram desenvolvidos alguns materiais para detecção de traços, tais como, os polycarbonatos LEXAN® e MAKROFOL®, os nitratos de celulose DAICEL® e LR-115® e o allyldiglicolcarbonato, CR-39® (Paulo, 1991). Estudos nacionais recentes aplicam o Durolon®, um polycarbonato nacional de fácil acesso que apresenta resultados adequados na detecção de partículas alfa e nêutrons (Aquino et al., 2014, Puglielsi, 2008). Entre os detectores de traços disponíveis comercialmente (FIG. 3.1), o CR-39 é o que apresenta melhor qualidade óptica, já que é transparente e possibilita um contraste ideal entre o traço produzido e o próprio corpo do plástico.

Figura 3.1: Traços na superfície de diferentes detectores de traços; (a) Lr-115®, (b) Makrofol®, (c) Durolon®, (d) Cr-39® (Arquivo pessoal)

3.1.1 Determinação da concentração de Rn-222 no ar com detectores sólidos de traços nucleares

A determinação da concentração de Rn-222 nos locais estudados foi realizada por detecção passiva com o uso de detectores de traços nucleares com câmaras de difusão do tipo NRPB (National Radiological Protection Board). A câmara permite que somente o radônio possa se difundir em seu interior e atingir o detector. A escolha da câmara baseia-se nas características de pequena geometria, proteção a possível violação do detector, além de ter resposta independente das condições ambientais (Neman, 2000).

A concentração de radônio no ar foi calculada por meio da equação (3.1), a partir da densidade de traços na superfície do detector exposto, do tempo de exposição e do fator de calibração que relaciona a densidade de traços na superfície do detector e a concentração de radônio no ar (Mayya et al., 1998).

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

Onde:

C_{Rn} - Concentração de ^{222}Rn no ar (Bq/m^3);

D - Densidade de traços (traços/cm^2);

k - fator de calibração (traços/cm^2 por $\text{Bq/m}^3 \text{ d}$);

t - tempo de exposição (d).

A densidade de traços (D) utilizada no cálculo da concentração foi obtida descontando-se a densidade de traços relativa à radiação de fundo, obtida a partir da análise de um detector não exposto. A radiação de fundo em detectores CR-39 pode variar de lote para lote, ou até mesmo em diferentes regiões de uma mesma placa com vários detectores (IAEA, 2013). A radiação de fundo foi determinada para cada lote, revelando um detector não exposto e determinando a radiação de fundo, a cada período de montagem das câmaras.

O fator de calibração (k) estabelece uma relação entre a densidade de traços presente no detector e a concentração de Rn-222 no ar. Para obter esse fator de calibração experimentalmente é necessário expor detectores idênticos aos utilizados nos estudos a uma concentração conhecida de Rn-222. O fator de calibração foi calculado a partir da equação 3.2 (Mayya et al., 1998).

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

Onde:

k - fator de calibração (traços/cm^2 por $\text{Bq/m}^3 \text{ d}$);

D- Densidade de traços (traços/cm^2);

C_{Rn} -Concentração de Rn-222 (Bq/m^3);

t - tempo de exposição (d);

3.1.2 - Avaliação da dose de radiação devido à inalação de Rn-222

A inalação é a principal via de incorporação do radônio. A dose de radiação recebida pelos tecidos do trato respiratório devido a sua inalação e de seus descendentes não pode ser diretamente medida. A sua determinação pode 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 Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), ao longo dos anos, estabeleceu limites para exposição ao Rn-222 no ar para indivíduos ocupacionalmente expostos e indivíduos do público. Na avaliação da concentração de Rn-222 no ar, a ICRP estabelece limites diferentes para as residências e os locais de trabalho. As diferenças para a avaliação desses locais estão nos limites de dose estabelecidos, no tempo de permanência dos indivíduos nesses locais e nos níveis de referência permitidos, que representam o nível máximo de concentração de Rn-222 no ar (tabela 3.1).

Tabela 3.1: Publicações da ICRP

Tipo de abordagem para avaliação do risco ao Rn	Publicação da ICRP	Níveis de Referência (concentração de Rn-222 no ar)
Residência	Pub. 39	500 Bq/m ³
	Pub. 65	600 Bq/m ³
	Pub. 103	600 Bq/m ³
	<i>Statement</i> 2009	300 Bq/m ³
Local de trabalho	Pub. 65	1500 Bq/m ³
	Pub. 103	1000 a 1500 Bq/m ³
	<i>Statement</i> 2009	1000 Bq/m ³

Outras entidades como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) (1993) e a Organização Mundial de Saúde (OMS) (2009),

recomendam níveis de referência para a concentração de Rn-222 no ar em residências, 148 Bq/m³ e 100 Bq/m³, respectivamente. A OMS, no entanto recomenda que, se este nível não puder ser alcançado nas condições específicas de cada país, o nível de referência escolhido não deve ser superior a 300 Bq/m³, que representa cerca de 10 mSv/a de acordo com o *Statement* de 2009 da ICRP.

A dose devido à inalação de Rn-222 foi calculada a partir dos procedimentos da UNSCEAR (2000), por meio da equação 3.3. Para os valores do fator de equilíbrio, de ocupação e de conversão de dose, aplicou-se aqueles recomendados no UNSCEAR (2000).

$$E = C_{Rn} \times F \times O \times T \times FCD \quad (3.3)$$

E- dose efetiva devido à inalação do radônio (mSv/a);

C_{Rn} - concentração de Rn-222 no ar (Bq/m³);

F – fator de equilíbrio (0,4);

O – fator de ocupação (0,8);

T - Tempo de exposição (h/a);

FCD - fator de conversão de dose (9 nSv h/Bq/m³).

3.2 Determinação da concentração de radionuclídeos emissores gama nos materiais de construção

A técnica de espectrometria gama consiste na detecção dos raios gama emitido pelos radioisótopos presentes nas amostras, a partir da interação dessa radiação com detectores. Por meio dessa técnica é possível realizar uma determinação qualitativa e quantitativa dos radioisótopos presentes na amostra, além de possibilitar a determinação de vários radioisótopos numa mesma medida (Villaverde, 2008, Maduar, 2010).

A aplicação dessa técnica consiste no preparo das amostras, na medida da amostra e aquisição dos espectros e a análise desses espectros.

A concentração dos radionuclídeos emissores gama foi feita por meio da equação 3.4:

$$C = \frac{\text{Área} - \text{BG}}{m \cdot t \cdot \varepsilon \cdot I \cdot \gamma} \quad (3.4)$$

Onde:

C - concentração do radionuclídeo de interesse (Bq/kg);

Área - área do pico da transição gama considerada;

BG - radiação de fundo para a transição gama considerada;

m - massa da amostra (kg)

t - tempo de contagem (s);

ε - eficiência do detector;

I γ - intensidade absoluta da transição gama considerada.

3.2.1 Índices radiológicos

Para a avaliação da exposição gama proveniente dos materiais de construção, foram determinados os seguintes parâmetros: atividade equivalente de rádio (Ra_{eq}), índice de concentração de atividade ou índice gama (I) e dose efetiva por exposição gama externa.

A atividade equivalente de rádio é um índice bastante utilizado como padrão de segurança na avaliação da exposição da população em residências e compara as concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 nos materiais utilizados na construção, levando-se em conta o risco associado a cada um deles. Este índice é baseado na estimativa de que 1 Bq/kg de Ra-226, 0,7 Bq/kg de Th-232 e 13 Bq/kg de K-40 produzem a mesma taxa de dose. A atividade equivalente de rádio foi calculada por meio da equação 3.5 (Beretka e Mathew, 1985).

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43 * C_{Th} + 0,07 * C_K \quad (3.5)$$

Onde:

C_{Ra} , C_{Th} e C_K são as concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40, respectivamente em Bq/kg.

O índice de concentração de atividade (I) foi calculado conforme sugerido pela Comissão Europeia (E.C.,1999).

$$I = \frac{C_{Ra}}{300} + \frac{C_{Th}}{200} + \frac{C_K}{3000} \quad (3.6)$$

Onde:

C_{Ra} , C_{Th} e C_K são as concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , respectivamente em Bq/kg.

De acordo com as recomendações da Comissão Europeia, tanto na publicação de 1999, quanto em sua atualização em 2014; para que a dose recebida pelos indivíduos expostos à radiação gama presente nos materiais não exceda o valor de 1 mSv/a, o índice de concentração de atividade (I) deve ser menor que 1 para os materiais utilizados na estrutura da construção, por exemplo, concreto e deve ser inferior a 6 para os materiais superficiais.

A dose efetiva decorrente da exposição gama externa devido aos materiais de construção foi calculada seguindo os procedimentos descritos pela UNSCEAR (2000), conforme a equação 3.7:

$$E = T \cdot f_0 \cdot b \cdot 10^{-6} \cdot D_R \cdot mi \quad (3.7)$$

Onde:

E - dose efetiva por exposição externa (mSv/a);

T – tempo de ocupação de 8760 horas por ano;

f_0 - fração de ocupação interna (0,8);

b - fator de conversão de dose absorvida no ar para dose efetiva (0,7 Sv/Gy);

D_R – taxa de dose absorvida no ar; (nGy/h)

m_i - fração de massa de material.

A taxa de dose absorvida no ar (D_R) foi avaliada de acordo com a modelagem descrita de EC 1999, conforme equação 3.8:

$$D_R = (0,92 \cdot C_{Ra} + 1,1 \cdot C_{Th} + 0,08 \cdot C_K) \quad (3.8)$$

Onde:

C_{Ra} , C_{Th} e C_K são as concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40, respectivamente em Bq/ kg.

3.3 Determinação da exalação de Rn-222 no solo e nos materiais de construção pelos modelos propostos pela UNSCEAR

O solo é o maior contribuinte para as concentrações de Rn-222 nos ambientes. Por ser inerte, o processo de difusão desse radionuclídeo é extensivamente maior quando comparado a outros radionuclídeos presentes no solo. Neste trabalho a exalação de Rn-222 no solo foi calculada pelo modelo teórico adotado pela UNSCEAR (2000). Neste modelo é utilizado parâmetros como a concentração de Ra-226 presentes na amostra, a porosidade e a permeabilidade do solo, entre outros fatores, conforme a equação 3.9 (UNSCEAR, 2000).

$$J_D = C_{Ra} \cdot \lambda_{Rn} \cdot f_e \cdot p_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L \quad (3.9)$$

Onde:

J_d = Taxa de exalação ($Bq/m^2 h^1$);

C_{Ra} = concentração de Ra-226 na amostra (Bq/kg);

λ_{Rn} = Constante de decaimento do Rn-222 (h^{-1});

f_e = Coeficiente de emanação (kg/m^3);

P_s = densidade real da amostra (g/cm^3);

ε = Porosidade na amostra ;

L = Coeficiente de difusão (m).

A concentração de Ra-226 (C_{Ra}) foi medida por meio da espectrometria gama. As amostras de solo foram trituradas, seladas e armazenadas durante 30 dias em frascos de polietileno de 100 mL. A densidade real da amostra e a porosidade foram calculadas a partir da metodologia proposta pela EMBRAPA, 1997, descrita no item 4.3.

O coeficiente de difusão foi calculado pela equação $(D_e/\lambda_{Rn})^{1/2}$, onde D_e é o coeficiente efetivo de difusão.

Os materiais de construção também contribuem para a concentração de Rn-222 no ar por meio da exalação do gás. A exalação do Rn-222 nos materiais de construção depende de fatores como a concentração de Ra-226 na amostra, da umidade e porosidade do material e pode ser determinada experimentalmente, ou a partir de modelos teóricos, como o proposto por UNSCEAR (2000).

$$J_D = C_{Ra} \cdot \lambda_{Rn} \cdot f \cdot p \cdot L \cdot \tanh\left(\frac{d}{L}\right) \quad (3.10)$$

Onde:

J_d = Taxa de exalação ($Bq/m^2 h^1$);

C_{Ra} = concentração de Ra-226 na amostra (Bq/kg);

λ_{Rn} = Constante de decaimento do Rn-222 (h^{-1});

f = Coeficiente de emanação (kg/m^3);

P = densidade real da amostra (g/cm^3);

d = Meia espessura do material (m);

L = Coeficiente de difusão (m).

Assim como nas amostras de solo, a concentração de Ra-226 nos materiais de construção foi medida por meio da espectrometria gama e a densidade real da amostra obtida pela metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Para os valores de coeficiente de difusão e emanação foram utilizados os valores sugeridos no anexo b da UNSCEAR (2000).

A partir da taxa de exalação de Rn-222 nos materiais de construção é possível estimar a taxa de entrada desse radionuclídeo e sua concentração no ambiente, adotando-se o conceito de quarto padrão. Nesse trabalho aplicou-se o modelo sugerido por Shweikani e Raja (2009).

$$G = E_x \cdot A \quad (3.11)$$

Onde:

G = taxa de entrada de radônio no ambiente (Bq/h);

E_x = taxa de exalação de radônio (Bq/m h);

A = área de exalação (m²).

A partir da taxa de entrada de radônio no ambiente e das dimensões do quarto padrão, estimou-se a concentração de Rn-222 no ar, por meio da equação 3.11;

$$C = \frac{G}{(V (N + \lambda))} \quad (3.12)$$

Onde:

C = concentração de radônio no quarto padrão (Bq/m³);

G = taxa de entrada de radônio no ambiente (Bq/h);

V = Volume do quarto padrão (m³);

N = taxa de ventilação de ar (h⁻¹);

λ = Constante de decaimento do Rn-222 (h⁻¹).

No prédio residencial, as medidas do quarto padrão são de 2,5m x 4,1m x 3,5m, conforme figura 3.2. Considerando a área das paredes e do teto, o valor encontrado foi de 58,05 m². A taxa de ventilação foi de 0,5 por hora.

Figura 3.2: representação do quarto padrão

4. PARTE EXPERIMENTAL

4.1. Área de estudo

A concentração de Rn-222, foi avaliada em duas edificações no estado de São Paulo; uma universidade na cidade de São Paulo, e um edifício residencial na cidade de Peruíbe. Em ambos os casos foram avaliados ambientes nos diferentes pavimentos, dois andares acima e dois abaixo do nível do solo, além do nível térreo.

Na universidade foram analisadas as concentrações de Rn-222 nos laboratórios, salas de aulas, estacionamento e outros ambientes de convívio dos discentes e funcionários. No edifício residencial, foram analisados apartamentos, estacionamento e ambientes em geral, do edifício.

No edifício residencial, os materiais de construção do e o solo do edifício, também foram analisados.

4.2 Montagem das câmaras de difusão

Para determinação da concentração de Rn-222 nos ambientes estudados foi utilizada a técnica de detecção passiva com o uso de detectores de traços nucleares do estado sólido tipo CR-39 inseridos em uma câmara de difusão do tipo NRPB® (FIG 4.1).

Figura 4.1: Câmara de Difusão tipo NRPB aberta, com detector de traços (Arquivo pessoal)

A fim de obter resultados representativos da concentração de Rn-222 no ar nos ambientes, os detectores devem ser colocados em vários ambientes. Se a edificação tem mais do que um pavimento, pelo menos um ambiente por pavimento deve ser monitorado a fim de obter informação sobre a variação da concentração de Rn-222 entre os pavimentos (AIEA, 2013). Nesse trabalho em cada pavimento foram monitorados no mínimo dois pontos de amostragem, com exceção dos estacionamentos.

Os detectores foram expostos nos locais de estudo por aproximadamente 90 dias, em cada ponto de amostragem foram posicionadas duas câmaras de difusão com um detector de traços no interior de cada uma delas (FIG 4.2). A concentração de Rn-222 no ar em cada ponto de amostragem é dada pela média aritmética da concentração obtida em cada detector de traços e a incerteza é expressa como o desvio padrão entre os pontos.

Figura 4.2: Câmaras prontas para exposição (arquivo pessoal)

Após a exposição os detectores passaram por ataque químico com solução de hidróxido de potássio, 30% em massa, durante 5,5 horas a 80° C (Neman, 2000).

O processo de revelação é determinante na aparência final dos traços, portanto é muito importante garantir condições adequadas e controladas de

revelação. Além da concentração da solução, a temperatura tem grande influência no formato dos traços, assim, é preciso garantir que a variação de temperatura durante o processo de revelação seja a menor possível.

O sistema de revelação utilizado consiste em um banho-maria Quimis® modelo Q215s, com precisão de $\pm 1,5^\circ \text{C}$. Os detectores foram alocados em recipientes de vidro (becker) de 25 ml, de forma que pudessem ser revelados em recipientes individuais.

Embora seja uma alternativa de baixo custo e acessível, o fato dos recipientes serem colocados diretamente sobre a grade do banho-maria, faz com que se desloquem em virtude da agitação de água e que recebam respingos devido ao movimento do agitador, alterando a concentração da solução. A fim de solucionar o problema, foram inseridos recipientes de vidro (becker) de 200 ml com água destilada criando uma barreira que evita tanto o deslocamento, quanto os respingos (FIG 4.3). Após a revelação, os detectores foram colocados em tubos Falcon de 45 ml, foi adicionada água destilada aos tubos, que foram agitados por diversas vezes, a fim de retirar resíduos de solução reveladora dos detectores.

Figura 4.3: Sistema de revelação (Arquivo pessoal)

Uma vez revelados, os detectores foram observados (FIG 4.4) num microscópio óptico ZEISS modelo Axiolmager para luz transmitida, com objetiva de

10x. O equipamento está ligado a uma câmara de vídeo marca ZeissICc-1 e acoplado a um microcomputador com monitor LCD de 29 polegadas.

Figura 4.4: Traços observados com objetiva de 10x

A densidade de traços (traços/cm²) na superfície do detector e o diâmetro dos traços foram determinados por meio do “software” de análise de imagens AXIOVISION da ZEISS.

O sistema de microscopia possui uma mesa automatizada que movimenta o detector durante a leitura, fazendo uma varredura na superfície do mesmo para a determinação da densidade de traços. É possível fazer a varredura completa da superfície do detector ou de parte dela. Uma vez que os traços são homogeneamente distribuídos sobre a superfície, optou-se por efetuar a leitura em parte da superfície (25,881 mm²) e extrapolar o resultado para a área total do detector, pois a relação entre a área do detector e a área de leitura é conhecida. Com essa configuração, a área fotografada de 25,881 mm² corresponde a 100 campos para leitura, por detector (FIG.4.5).

Figura 4.5: Layout do software AxioVision para varredura de 100 campos de leitura

Após a geração da imagem, foi usado um aplicativo que permite ajuste de brilho e contraste que parâmetros que são determinantes na tolerância de nível de cinza que será marcado e contado como traço.

Pelo fato que na imagem fotografada, os traços são exibidos em uma escala de níveis de cinza, o ajuste da tolerância de tons de cinza é determinante para o limite e forma dos contornos. Contornos mais regulares implicam numa marcação de mais traços com forma circular, ideais para a determinação do diâmetro e posteriormente da energia da partícula que formou o traço. O nível de tolerância é a janela que permite especificar com um número, o quão tolerante ou restritivo deve ser o tom de cinza para marcação dos traços. Quanto menor valor de tolerância, mais exata será a amostragem dos tons de cinza (FIG 4.6).

Figura 4.6: Marcação dos traços conforme ajustes de tolerância de cinza

O resultado da análise do detector é apresentado em planilha no formato xml, contendo a quantidade de traços seus respectivos diâmetros.

Embora o fator de calibração (k) para detectores de traços tipo CR-39 esteja disponível na literatura e seja fornecido pelos fabricantes, estabelecer o fator de calibração experimentalmente, proporciona uma verificação de conduta de todo procedimento, tal como a revelação e leitura dos detectores.

Para a determinação do fator de calibração, detectores de traços nucleares do estado sólido (CR-39) foram inseridos em uma célula de Lucas adaptada e expostos ao Rn-222 por meio do sistema de calibração RN-150 da *Pylon Eletronics Incorporation*. Este aparelho contém uma fonte sólida calibrada de Ra-226 de 3 kBq de atividade e opera com uma bomba de vácuo, liberando uma concentração de Rn-222 de $15,2 \text{ kBq/m}^3$ para o recipiente que contém o detector a ser calibrado (Pylon, 1992).

A célula de Lucas adaptada (FIG 4.7), após o processo de emanção, ficou selada cerca de 4 dias, o que corresponde a aproximadamente uma meia-vida do Rn-222; dessa forma, o gás e os seus descendentes estavam presentes no ambiente confinado da célula de Lucas, sensibilizando o detector.

Figura 4.7: Célula de Lucas adaptada. (a) fechada (b) aberta

Fonte: (Cacurri, 2007)

Foram realizados seis experimentos para determinação do fator de calibração, o valor médio obtido foi de $0,0534 \pm 0,0021$ (traços/cm² por Bq/m³ d¹).

Tabela 4.1: Fator de calibração

Calibração	Tempo de exposição (dias)	Fator de Calibração
		(traço/cm ² por Bq/m ³ ·d)
1	3,9	$0,0505 \pm 0,0001$
2	3,9	$0,0526 \pm 0,0001$
3	3,8	$0,0566 \pm 0,0001$
4	4,1	$0,0525 \pm 0,0002$
5	3,3	$0,0541 \pm 0,0003$
6	3,1	$0,0549 \pm 0,0003$

Valores compatíveis com os resultados da literatura que variam de 0,0505 à 0,0672 (traços/cm² por Bq/m³ d¹) (Mayya et al., 1998; Manocchi, 2014; Al-Nafiey et. al 2012).

4.3 Determinação dos níveis gama de Ra-226, Th-232 e K-40 no solo e nos materiais de construção

Para a exposição gama decorrente do solo e dos materiais de construção utilizados no edifício residencial na cidade de Peruíbe, os materiais e o solo foram analisados pela técnica de espectrometria gama.

Um total de 25 amostras de materiais de construção (cimento, tijolo vermelho, argamassa, tijolo de cimento e areia) foram trituradas, armazenadas em frascos de polietileno de 100 mL e seladas durante aproximadamente 30 dias para que o equilíbrio radioativo entre os descendentes das séries do tório e do urânio, especificamente o Ra-226 e seus produtos de decaimento de meia-vida curta fosse atingido. O mesmo procedimento foi adotado nas amostras de solo.

A radiação de fundo foi determinada medindo-se um recipiente de igual geometria que o utilizado para as amostras, contendo água deionizada.

A eficiência de contagem foi previamente determinada para mesma geometria de frasco de polietileno de 100ml, numa faixa de energia de 40 a 3000 keV.

As concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 nas amostras foram determinadas por espectrometria gama por meio de um detector de germânio hiperpuro GX2518 modelo Canberra, de configuração vertical, 25% de eficiência relativa e resolução efetiva de 1,9 keV relativa ao pico de 1332 keV do Co-60, associado a um módulo electrónico DSA1000 e acoplado a um microcomputador. As amostras foram medidas durante um tempo de 86.000 segundos e os espectros obtidos foram analisados com o *software* Interwinner 4.0 de *Eurisys Measurements Incorporation*.

Para a determinação do Ra-226 utilizou-se as transições de 295,2 keV e 351,9 keV do Pb-214, e 609,3 keV e 1120,3 keV do Bi-214. A determinação da concentração do Th-232 foi feita a partir das transições de 238,6 keV e 300,1 keV do

Pb-212, 911,1 keV e 968,9 keV do Ac-228, e 727,3 keV correspondentes ao Bi-212. O K-40 foi determinado diretamente por meio da transição de 1460,8 keV.

4.4 Densidade real e porosidade total

A densidade real (relação existente entre a massa numa amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas) e a porosidade total (espaços porosos ocupados por solo ou ar), foi determinada pela metodologia do balão volumétrico descrita pela EMBRAPA (1997);

Para a medida da densidade real, o método consiste em transferir 5 g do solo peneirado em malha de 2 mm, para um balão volumétrico. As amostras posteriormente foram pesadas em balança analítica, para medição de massa do balão mais o solo. Adição de álcool com auxílio de uma bureta, até o traço de aferição, e leitura do volume de álcool gasto.

Na determinação da porosidade foi aplicada a equação 4.1, que leva em conta a densidade real e a densidade aparente:

$$P = 100 \cdot \frac{(P_r - P_a)}{P_r} \quad (4.1)$$

Onde:

P_r = Densidade real (g/cm³);

P_a = Densidade aparente (g/cm³).

5. RESULTADOS

5.1 Concentração de Rn-222 nos edifícios

A concentração de Rn-222 no ar foi determinada nos pontos de amostragem estabelecidos no item 4.1, nas instalações da universidade e no prédio residencial, pelo período mínimo de um ano, totalizando quatro medidas em cada local.

Na universidade, no período estudado de abril de 2013 a junho de 2014, foram analisados laboratórios, salas de aulas e outros ambientes de convívio. No edifício residencial, foram analisados apartamentos e outros ambientes de área comum, no período de outubro de 2013 a outubro de 2014.

Na tabela 5.1 são apresentados os valores das concentrações médias e desvios padrão de Rn-222 no ar obtidas na universidade.

Tabela 5.1: Concentração de Rn-222 no ar (Universidade)

Concentração (Bq/m ³)						
Pavimento	Local	Ventilação	Período 1 (04/2013 à 07/2013)	Período 2 (07/2013 à 11/2013)	Período 3 (11/2013 à 02/2014)	Período 4 (02/2014 à 06/2014)
2	Sala de aula 201	Natural	14,1 ± 0,5	8,3 ± 0,2	6,7 ± 0,5	5,6 ± 0,3
2	Corredor	Natural	6,4 ± 0,2	5,5 ± 0,5	4,1 ± 0,2	4,0 ± 0,1
2	Sala de aula 215	Natural	(a)	8,8 ± 0,3	9,5 ± 0,3	5,8 ± 0,3
1	Sala de aula 101	Natural	10,8 ± 0,2	11,4 ± 0,2	6,2 ± 0,2	6,8 ± 0,1
1	Corredor	Natural	8,5 ± 0,2	6,2 ± 0,2	4,4 ± 0,2	3,8 ± 0,3
1	Sala de aula 115	Natural	12,7	(a)	4,6 ± 0,2	5,8 ± 0,3
Térreo	Biblioteca	Natural	13,2 ± 0,5	10,0 ± 0,9	10,7 ± 0,7	8,8 ± 1
Térreo	Saguão 2	Natural	13,0 ± 0,3	(a)	9,2 ± 0,7	9,5 ± 0,3
1 subsolo	Saguão	Ar condicionado	14,8 ± 0,2	14,7 ± 0,3	15,4 ± 0,3	11,7 ± 1
1 subsolo	Laboratório Informática	Ar condicionado	11,1 ± 0,3	13,6 ± 0,3	15,1 ± 0,3	11,1 ± 0,1
1 subsolo	Sala dos Funcionários	Ar condicionado	15,5 ± 0,2	13,1 ± 0,9	12,9 ± 0,2	11,7 ± 0,4
2 subsolo	Estacionamento	Natural	18,1 ± 0,5	33,3 ± 0,7	34,9 ± 0,5	31,3 ± 1

(a) Detectores extraviados

A figura 5.1 apresenta a concentração de Rn-222 por pavimento monitorado em cada um dos quatro períodos estudados.

Figura 5.1: Concentração média de Rn-222 por pavimento monitorado na universidade durante os quatro períodos avaliados

Na figura 5.2 é apresentada a concentração média de Rn-222 em cada um dos pavimentos monitorados na universidade.

Figura 5.2: Concentração média de Rn-222 nos pavimentos monitorados na universidade

Nos ambientes da universidade, as concentrações variaram entre $3,8 \pm 0,3$ e $14,1 \pm 0,5$ Bq/m³ acima e no nível do solo (salas de aula, biblioteca e saguão) e nos ambientes abaixo do nível solo (laboratório de informática e estacionamento) entre $11,1 \pm 0,3$ e $34,9 \pm 0,5$ Bq/m³. As menores concentrações foram obtidas nos corredores das salas de aula, tanto no primeiro, quanto no segundo pavimento. Pode ser observado que o estacionamento localizado no segundo subsolo é o ambiente com as maiores concentrações, o que já era esperado, uma vez que esse ambiente está abaixo do nível do solo e apresenta menor ventilação que demais locais estudados.

No edifício residencial, a avaliação da concentração de Rn-222 no ar foi realizada no período de outubro de 2013 a outubro de 2014, em vários ambientes do edifício. Também foram monitorados três apartamentos sob diferentes condições de ventilação. No apartamento 1 o fornecimento de ventilação era natural, no apartamento 2 havia ar condicionado e o apartamento 3 permaneceu fechado no período de monitoração.

Na tabela 5.2 são apresentados os valores das concentrações médias de Rn-222 no ar obtidos no edifício residencial na cidade de Perúibe.

Tabela 5.2: Concentração de Rn-222 no ar (Prédio Residencial)

Concentração de Rn-222 (Bq/m ³)						
Pavimento	Local	Ventilação	Período 1 (10/2013 à 01/2014)	Período 2 (01/2014 à 04/2014)	Período 3 (04/2014 à 07/2014)	Período 4 (07/2014 à 10/2014)
Apartamentos						
2	Apartamento 1*	Natural	13,3 ± 2,8	13,6 ± 3,7	12,6 ± 3,1	11,2 ± 3,1
2	Apartamento 2*	Ar condicionado	21,2 ± 1,2	25,4 ± 3,6	24,9 ± 3,9	25,4 ± 3,6
2	Apartamento 3*	Fechado	27,5 ± 2,6	33,1 ± 3,1	28,1 ± 2,3	(a)
Ambientes de área comum						
2	Sala Limpeza	Natural	25,1 ± 0,4	31,1 ± 1,6	26,6 ± 0,4	22,1 ± 0,8
2	Corredor	Natural	15,9 ± 1,1	13,9 ± 1,2	15,7 ± 1,6	10,6 ± 1,2
1	Salão	Natural	17,4 ± 0,4	18,3 ± 0,8	19,3 ± 0,4	15,7 ± 0,8
1	Corredor	Natural	15,5 ± 0,8	14,7 ± 0,4	12,2 ± 1,2	10,2 ± 1,6
Térreo	Hall	Natural	21,2 ± 1,1	26,2 ± 0,8	30,7 ± 1,6	33,8 ± 2,4
1 subsolo	Depósito 1	Ar condicionado	28,4 ± 0,8	37,8 ± 1,2	36,6 ± 1,2	42,5 ± 1,6
1 subsolo	Depósito 2	Ar condicionado	40,2 ± 0,4	51,3 ± 2,0	59,4 ± 0,4	64,1 ± 1,2
2 subsolo	Estacionamento	Natural	50,1 ± 0,4	73,9 ± 2,4	78,3 ± 0,4	84,2 ± 1,6

(a) Detectores extraviados

* Média de 5 monitores NRPB por período

A figura 5.3 apresenta a concentração de Rn-222 por pavimento nos 4 períodos estudados. Verifica-se uma tendência de diminuição da concentração de radônio no ar com o período de monitoramento nos pavimentos superiores e uma relação inversa no térreo e subsolo.

Figura 5.3: Concentração de Rn-222 por pavimento monitorado no edifício residencial durante os quatro períodos avaliados

Na figura 5.4 é apresentada a concentração média de Rn-222 em cada um dos pavimentos monitorados no edifício residencial na cidade de Peruíbe.

Figura 5.4: Concentração média de Rn-222 nos pavimentos monitorados no edifício residencial

No edifício residencial, os locais monitorados localizados nos pavimentos acima do nível do solo, exceto os apartamentos, apresentaram concentrações entre $10,2 \pm 1,6$ e $31,1 \pm 1,6$ Bq/m³. Assim como no prédio da universidade, as menores concentrações foram obtidas nos corredores, localizados acima do nível do solo, em média $14,1 \pm 1,7$ Bq/m³ e as maiores nos estacionamentos encontrados no segundo subsolo, em média $67,4 \pm 1,2$ Bq/m³.

Como pode ser observado na figura 5.5, os apartamentos do edifício em Perúibe, monitorados sob diferentes condições de ventilação, apresentaram variação na concentração média de Rn-222 no ar. Como esperado, a concentração média do apartamento que ficou fechado foi a maior, $29,5 \pm 2,3$ Bq/m³, seguido do apartamento com ventilação fornecida por condicionadores de ar $24,2 \pm 1,5$ Bq/m³, o apartamento com ventilação natural apresentou a menor concentração $12,6 \pm 0,7$ Bq/m³. Tal comportamento também foi observado por Cavalo et al. (1996), que constataram uma diminuição da concentração de Rn-222 com o aumento da ventilação (natural e forçada) e que dentre as fontes de ventilação, a natural foi a mais eficaz.

Figura 5.5: Concentração média de Rn-222 nos apartamentos do segundo pavimento do edifício residência em virtude do fornecimento de ventilação

Os resultados obtidos apresentam baixas concentrações de Rn-222 no ar para todos os locais monitorados na universidade, variando de 3,8 a 34,9 Bq/m³ e para o prédio residencial, variando $10,2 \pm 0,4$ a $84,2 \pm 1,6$. Esses valores são inferiores aos limites estabelecidos pela ICRP, de 300 Bq/m³ para residências e 1000 Bq/m³ para locais de trabalho (ICRP,2009). Os resultados obtidos são inferiores também aos encontrados por outros autores em diversas localidades do Estado São Paulo (Campos, 1994; Neman, 2000; Geraldo et al., 2005; Silva e Yoshimura, 2005; Marques et al., 2006).

Em todos os ambientes acima do nível do solo, as concentrações obtidas são concordantes com os valores encontrados na literatura (Antignani et al., 2009; Papachristodoulou et al., 2010; Sánchez et al., 2012) para ambientes semelhantes. Por outro lado, os ambientes térreos apresentam valores inferiores aos encontrados por Campos e Pecequillo (2003), que estudaram os níveis de Rn-222 em habitações populares térreas na cidade de Santo André, estado de São Paulo. Em relação aos ambientes subterrâneos, os resultados encontram-se dentro da faixa de valores obtida por Sabol (2013), que monitorou estações subterrâneas de metrô em Praga, e por Trevisi et al. (2012), que monitoraram locais de trabalho subterrâneos na Itália e são compatíveis com os valores de Li et al. (2006), que estudaram diversos ambientes subterrâneos em 23 cidades na China (tabela 5.3).

Tabela 5.3: Valores de literatura para ambientes semelhantes

Tipo de Pavimento	Concentração mínima (Bq/m³)	Concentração máxima (Bq/m³)	Referencia
1º e 2º acima do solo	20	132	Papachristodoulou et al., 2010
	18	686	Antignani et al., 2009
	6	127	Todorovic et al., 2013
	4	31	Este trabalho
Térreo	25	45	Campos, 1994
	5	77	Antignani et al., 2009
	9	34	Este trabalho
Subsolo	----	32	Sabol, 2013
	14	2482	Li et al., 2006
	17	89	Antignani et al., 2009
	11	84	Este trabalho

5.2 Níveis de Ra-226, Th-232 e K-40 nas amostras de materiais de construção

A tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos para a concentração dos radionuclídeos Ra-226, Th-232 e K-40 nas amostras de materiais utilizados na construção do edifício residencial na cidade de Peruíbe. Para efeito de comparação são apresentados também dados de literatura (Campos, 1994; Lu, 2014; El Mageed et al., 2014).

Tabela 5.4: Concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 nos materiais de construção do edifício residencial de Peruíbe

Material	Concentração (Bq/kg)			Referência
	Ra-226	Th-232	K-40	
Tijolo Vermelho	73,1 ± 0,3	97,2 ± 1	735,1 ± 1,7	Este trabalho
	41,4 ± 2,5	58,8 ± 5,5	605,3 ± 35,8	Campos, 1994
	124,7 ± 15,3	28,9 ± 1,4	390,2 ± 9,8	Lu,2014
Cimento	13,9 ± 0,1	42,2 ± 3,9	242,9 ± 1,5	Este trabalho
	53,3 ± 1,2	18,7 ± 0,6	149,5 ± 6,3	Campos, 1994
	118,2 ± 14,2	36,1 ± 17,8	444,5 ± 163,1	Lu,2014
Argamassa	15,5 ± 2	12,8 ± 9,6	206,6 ± 23	Este trabalho
Tijolo de Cimento	60,45 ± 0,3	41,9 ± 0,8	1278,5 ± 175,5	Este trabalho
	37,1 ± 3,2	31,8 ± 2,7	734,1 ± 21,1	El Mageed et al., 2014
Areia	72,7 ± 3,5	172,8 ± 7,1	550,3 ± 3,2	Este trabalho
	31,2 ± 1,9	56,6 ± 4,5	349 ± 9,7	Campos, 1994
	32,5 ± 21,6	47,7 ± 12,1	249,6 ± 22,8	Lu,2014

Pode-se observar que a maioria dos materiais de construção apresenta concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 compatíveis com valores médios mundiais obtidos por outros autores, com exceção da areia, que apresentou uma elevada concentração de Th-232 e do tijolo de cimento que apresentou valores de K-40 acima dos valores mundiais.

A partir das concentrações de Ra-226, Th-232 e K-40 obtidas, foram calculados a atividade equivalente de rádio (Ra_{eq}), e o índice de concentração de atividade (I) Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Índices de risco radiológico por exposição à radiação gama

Material	Ra_{eq}	Índice de concentração de atividade (I)
Tijolo Vermelho	263,5	0,9
Cimento	91,2	0,3
Argamassa	48,3	0,2
Tijolo de Cimento	209,9	0,8
Areia	358,3	1,3

Os valores de equivalente de rádio para todos os materiais de construção são inferiores ao valor recomendado de 370 Bq/kg pela UNSCEAR (2000). Aplicando os critérios recomendados pela Comissão Europeia para materiais de construção, somente a areia contém concentração elevada de Th-232, e não atende ao critério, pois o índice de concentração de atividade obtido é ligeiramente superior a 1.

Para o cálculo de dose os materiais foram fracionados, estimando que para uma construção seja usado; 50% de blocos, 10% de cimento, 10% argamassa e 30% de areia. A dose efetiva por exposição gama externa para o morador é de 0,8 mSv/a.

5.3 Taxa de exalação de Rn-222 no solo

A taxa de exalação de Rn-222 no solo foi calculada a partir do modelo proposto no anexo B da UNSCEAR (2000), apresentado na equação 3.9. Esse modelo leva em conta entre vários fatores, a concentração de Ra-226, que foi determinada por espectrometria gama, a densidade real e a porosidade, determinada experimentalmente por meio da equação 4.1. A tabela 5.6 apresenta os valores de porosidade, concentração de Ra-226, Th-232 e K-40 e a taxa de exalação presentes no solo do edifício residencial.

Tabela 5.6: Taxa de exalação de Rn-222 no solo

Procedência	Porosidade total (%)	Concentração (Bq/kg)			Taxa de exalação de Rn-222 (Bq/m ² h)
		Ra-226	Th-232	K-40	
Solo Peruíbe	54	47,76 ± 3,5	130,60 ± 9,6	468,43 ± 32,9	0,079 ± 0,005

Os resultados obtidos para o solo do edifício residencial, em sua maioria, são compatíveis com os valores médios mundiais sugeridos pela UNSCEAR (2000), tanto para exalação de Rn-222, 0,016 (Bq/m² h¹), quanto para a concentração de Ra-226, Th-232 e K-40, 33, 45 e 420 (Bq/kg) respectivamente (FIG 5.6).

Figura 5.6: Concentração de Ra-226, Th-232 e K-40 no solo de Peruíbe

É observado que os valores de Th-232 são ligeiramente mais elevados do que a média mundial.

5.4 Taxa de exalação de Rn-222 nos materiais de construção

A taxa de exalação dos materiais de construção do prédio residencial (tabela 5.7) foi determinada pelo modelo proposto na UNSCEAR (2000), apresentado na equação 3.10. O modelo leva em conta, a concentração de Ra-226, que foi determinada por espectrometria gama, a porosidade no material, determinada pela metodologia da EMBRAPA (1997).

Tabela 5.7: A taxa de exalação dos materiais de construção do prédio residencial

Material	Densidade Real (g/cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)	Porosidade total (%)	Concentração de Ra-226 (Bq/Kg)	Taxa de exalação (Bq/m ² h)
Tijolo V	2,73	1,04	61,90	73,08	2,39
Cimento	2,25	1,14	49,33	13,89	0,39
Argamassa	2,08	1,02	50,96	15,53	0,42
Tijolo Cimento	2,64	1,84	30,30	60,45	0,96
Areia	2,01	1,07	46,76	72,67	1,79

Na tabela 5.8 é apresentada a taxa de exalação dos materiais de construção e dados de literatura.

Tabela 5.8 Taxa de exalação dos materiais de construção e comparação com valores de literatura

Material	Taxa de exalação (Bq/m ² h)	Referência
Tijolo Vermelho	2,39	Este trabalho
Tijolo Vermelho	9,72	Campos, 1994
Tijolo Vermelho	0,16	Sharma e Virk, 2011
Cimento	0,39	Este trabalho
Cimento	0,32	Campos, 1994
Cimento	0,38	Immé et al, 2014
Argamassa	0,42	Este trabalho
Tijolo de Cimento	0,96	Este trabalho
Tijolo de Cimento	0,94	Khan et al.,1992
Areia	1,79	Este trabalho
Areia	4,14	Campos, 1994
Areia	0,11	Khan et al.,1992

Como pode ser observado na tabela 5.8, todos os materiais analisados, estão dentro da faixa de valores encontrados na literatura.

Para a estimativa da taxa de entrada de Rn-222 proveniente dos materiais de construção nos diferentes andares do prédio residencial, foi aplicada a equação 3.12, o resultado obtido foi de 11,73 Bq/m³.

A fim de estimar a contribuição dos materiais de construção na concentração de Rn-222 nos ambientes, adotou-se a concentração de Rn-222 no ar obtida com os detectores de traços como a concentração total, ou seja contribuição do solo e dos materiais. A partir da concentração média de Rn-222 dos ambientes (pavimentos acima do nível do solo, térreo e subsolo) e da estimativa da concentração de Rn-222, advinda dos materiais, de 11,73 Bq/m³, foi

avaliada a contribuição do solo. Na figura 5.7 apresenta-se a contribuição de ambas as fontes de Rn-222.

Figura 5.7: relação entre a contribuição de Rn-222 do solo e os materiais de construção; (a) pavimentos acima do solo, (b) nível térreo, (c) subsolos

É notável a menor contribuição da concentração advinda do solo, nos níveis mais altos do edifício, devido a dificuldade do Rn-222, exalar e permear para esses ambientes, que estão a vários metros de distância do solo. Em contrapartida, os subsolos tem o solo, como o maior contribuinte para a concentração total.

Deve-se acrescentar ainda que a taxa de exalação Rn-222 no solo do edifício é da mesma ordem de grandeza de valores mundiais, 0,016 Bq/m² (UNSCEAR, 2000).

5.5 Dose efetiva devido à inalação de Rn-222

Para o cálculo da dose efetiva devido à inalação de Rn-222 (equação 3.3), foram considerados os procedimentos sugeridos pela UNSCEAR (2000).

Devido à variação das concentrações nos períodos e locais estudados, foram considerados dois cenários para a avaliação da dose de radiação pela inalação do Rn-222, um em que se utiliza o maior valor da concentração para o cálculo da dose e outro que utiliza o menor valor.

No edifício da universidade foi considerado um tempo de ocupação de 2000 horas por ano para os trabalhadores e de 1000 horas por ano para os discentes, que representa 200 dias letivos de 5 horas cada (FIG 5.8).

Figura 5.8: Estimativa da dose efetiva devido a inalação de Rn-222 no prédio da Universidade

A mesma abordagem foi adotada no cálculo da dose para os moradores do edifício residencial em Peruíbe, foi considerado um tempo de ocupação de 8760 horas por ano. A figura 5.9 apresenta a estimativa da dose efetiva devido a inalação de Rn-222 para os moradores do edifício residencial.

Figura 5.9: Estimativa da dose efetiva devido a inalação de Rn-222 no edifício residencial

5.6 Estimativa da Dose efetiva total

Uma vez que a exposição dos indivíduos aos materiais de construção ocorre, externamente pela exposição à radiação gama direta e internamente pela inalação do Rn-222 e seus produtos de decaimento de vida curta presentes no ar, torna-se necessário estimar uma dose total que considere as duas vias de exposição (Kovler, 2009, Campos, 1994).

Nesse trabalho, a abordagem adotada na estimativa de dose efetiva devido a inalação de Rn-222 é conservativa, no entanto, pouco representativa. Se nos subsolos encontram-se ambientes com baixa ocupação, como no caso dos estacionamentos, os resultados referentes à concentração de Rn-222, não devem ser usados para estimar a dose, pois a concentração pode ser muito diferente (geralmente mais elevada) do que no resto do edifício (Marcinowski, 1994; IAEA, 2013).

Assim, a dose para os moradores foi calculada considerando as concentrações de Rn-222 nos ambientes em que o tempo de ocupação é maior,

ou seja, os apartamentos. A título de comparação, também foi calculada a dose para o apartamento que ficou fechado (Tab. 5.9).

Tabela 5.9: Estimativa da dose efetiva devido a inalação de Rn-222 nos apartamentos

Apartamento	Dose (mSv/a)
Natural	0,32
Ar condicionado	0,61
Fechado	0,75

A partir da dose efetiva devido à exposição externa (0,8 mSv/a) e da dose efetiva devido a inalação do Rn-222 para cada apartamento, foi calculada uma dose total para os moradores do edifício residencial. Os resultados são apresentados na figura 5.10.

Figura 5.10: Estimativa da dose efetiva total

Observa-se, a partir dos resultados obtidos, que os materiais de construção contribuem preponderantemente para a dose recebida pelos moradores do edifício residencial em Perúibe.

Ressalta-se ainda que a localização dos apartamentos no segundo pavimento faz com que a contribuição do radônio proveniente do solo não seja tão significativa, quanto nos pavimentos abaixo e ao nível do solo, de forma que a concentração de Rn-222, neste cenário, possa ser considerada coadjuvante para a avaliação da dose total recebida por um morador.

6. CONCLUSÃO

As concentrações de Rn-222 no ar foram determinadas com o uso de detectores de traços nucleares, os resultados apresentaram boa reprodutibilidade, demonstrando aplicabilidade satisfatória da técnica. Para a determinação dos níveis de Ra-226, Th-232 e K-40, nas amostras de materiais de construção, foi aplicada a espectrometria gama, que também apresentou resultados satisfatórios.

Ainda que sejam baixas, foi possível observar que as concentrações de Rn-222 nos ambientes abaixo do nível do solo são superiores aos ambientes acima do nível do solo para as duas edificações estudadas.

As concentrações de Rn-222 no ar, obtidas no prédio da universidade, variaram entre $3,8 \pm 0,3$ e $34,9 \pm 0,5$ Bq/m³, com uma variação de 37% entre os pavimentos acima e abaixo do nível do solo, ao passo que no prédio residencial as concentrações variaram de $10,2 \pm 0,4$ a $84,2 \pm 1,6$ Bq/m³ com uma variação de 31% entre os pavimentos acima e abaixo do nível do solo.

Nos apartamentos com fornecimento de ventilação diferentes, as concentrações variaram 38%. O apartamento com ventilação natural apresentou as menores concentrações, que ressalta as recomendações da literatura que indicam medidas simples como abertura de portas e janelas na mitigação de Rn-222 no ar.

Os ambientes estudados apresentam concentração de Rn-222 bastante inferiores aos valores recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica, publicados no documento de 2009, de 300 Bq/m³ para residências e 1000 Bq/m³ para locais de trabalho.

Os resultados mostram que os materiais de construção analisados apresentam concentrações compatíveis com os valores médios mundiais, com exceção do tijolo de cimento e a areia, que são ligeiramente maiores do que a média mundial, assim como os índices de risco radiológico. A dose efetiva para um morador devido à exposição gama é inferior ao limite de dose anual para público em geral, de 1 mSv/a.

A taxa de exalação de Rn-222 no solo no edifício residencial apresenta valores da mesma ordem de grandeza daqueles sugeridos pela UNSCEAR (2000).

A dose efetiva total para um morador devido à exposição gama e a inalação de Rn-222, é inferior ao valor de 2,4 mSv/a, estimado pela UNSCEAR (2000), para fontes naturais de radiação.

REFERÊNCIAS

AL-NAIEY, A.S.; JAAFAR M.S.; BAUK, S.B.; SALIH, N.F, **Design and Fabrication of New Radon Chamber for Radon Calibration Factor of Measurement.**, International Journal of Scientific e Engineering Research, v.3, n.10, 2012

ANTIGNANI, S.; BOCHICCHIO, F.; AMPOLLINI, M.; VENOSO, G.; BRUNI B.; INNAMORATI S.; MALAGUTI L.; STEFANO A. **Radon concentration variations between and within buildings of a research institute.** Radiation Measurements, v.44, p. 1040-1044, 2009

AQUINO, R. R.; FERREIRA, A. O.; BRIGITTE R. S. P. **Estudos Preliminares do Uso de um Plástico Comercial Brasileiro como Detector de Traços Nucleares Para Partículas Alfa.** In: Latin American Symposium on Radon And II Symposium on Radon in Brazil, 2014, Poços de Caldas, v. 1. p. 25, 2014.

AXIOVISION, **Axiovision User Guide. Release 4.8.1**, 2009

BERETKA, J.; MATHEW, P.J. **Natural radioactivity of Australian building materials industrial wastes and by-products.** Health Physics, v.48, p.87-95, 1985.

CACCURI, L. S. **Avaliação da exposição ocupacional ao ^{222}Rn no galpão da salvaguardas do IPEN.** São Paulo 2007 (Dissertação de Mestrado) Universidade de São Paulo.

CAMPOS, M.P., **Avaliação do impacto radiológico provocado por materiais de construção em moradores de casas populares** (Dissertação de Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994

CAMPOS, M.P.; PECEQUILO, B.R.S. **Exposure assessment due to building materials in ordinary houses at Sao Paulo, Brazil.** Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento, v. 5, n. 2, p. 60-65, 2003.

CAVALO A.; GADSBY K.; REDDY T. A., **Use of natural basement ventilation to control radon in single family dwellings.** Atmospheric Environment, v.26. n.12, p. 2251-2256, 1992.

COSTA, L.P. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências.** São Paulo 2011 (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo.

DURMISEVIC, S., **The future of the underground space.** Cities, p233–245, 1999

DURRANI, S.A., **Nuclear tracks today: Strengths, weaknesses, challenges.** Radiation Measurements, v. 43, p. 26-36, 2008

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisas de Solos (CNPS), **Manual de métodos de análise de solo**, 2^a ed., Rio de Janeiro, EMBRAPA, 1997

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

EL-MAGEED, A. I. A, et al., **Natural radioactivity and radiological hazards of some building materials of Aden, Yemen**. Journal of Geochemical Exploration, v. 140 p. 41–45, 2014

EPA, Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, **EPA'S Strategy to Reduce Risk of Radon**, Special Report of Journal of Enviromental Health, 1993

EUROPEAN COMMISSION, Radiation protection 112 – **Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Directorate General Environment**, Nuclear Safety and Civil Protection, Finland, 1999

GERALDO, L.P.; SANTOS, W.; MARQUES, A.L.; BOTARI, A. **Medidas dos níveis de radônio em diferentes tipos de ambientes internos na região da Baixada Santista, SP**. Radiologia Brasileira, v. 38, n.4, p. 283-286, 2005

IAEA, International Atomic Energy Agency, **Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data**, (Technical Reports Series n.1363), Viena 2003

IAEA, International Atomic Energy Agency, **Radiation Protection Against Radon In Workplaces Other Than Mines**, (Safety Reports Series n.33), Viena 2003

IAEA, International Atomic Energy Agency, **National And Regional Surveys Of Radon Concentration In Dwellings**, (Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33), Viena 2013

IARC- Agency for Research on Cancer, **Man-made Mineral Fibres and Radon**, v. 43, New York, World Health Organization, 1998

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, **Censo Demográfico de 2010., dados referentes a cidade de São Paulo**, São Paulo, 2010.

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

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

ICRP-71. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients**. Pergamon Press. Oxford, 1995

IMMÉ G.; CATALANO R.; MANGANO G.; MORELLI D. **Radon exhalation measurements for environmental and geophysics study**. Radiation Measurements, v. 95, p. 349-351. 2014

JONASSEN N., **The Determination of Radon Exhalation Rates**, Health Physics, Denmark, v. 45 n.2, p. 369-376., 1983

KHAN, A.J.; PRASAD,R.; TYAGI, R.K. **Measurement of radon exhalation rate from some building materials**. Radiation Measurements, v. 20, p. 609-610. 1992

KELLER, G.; MUTH, H.; **Radiation Exposure In German Dwellings, Some Results and a Proposed Formula For Dose Limitation**, The Science of the Total Environment, V.45, P. 299—306, 1985

KOVLER, K., **Radiological constraints of using building materials and industrial by-products in construction**. Construction and Building Materials, v.23,p. 246–253, 2009

LI, X.; ZHENG, B.; WANG Y.; WANG X. **A survey of radon level in underground buildings in China**. Environment International, v 32.p 600-605. 2006

LU, X., **Determination of natural radioactivity and associated radiation hazard in building materials used in Weinan, China**. Radiation Physics and Chemistry, v99. p 62–67, 2014

MÁDUAR, M. F. **Desenvolvimento de um código computacional aberto de análise quantitativa para determinação de radionuclídeos por espectrometria gama com detectores semicondutores**. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MÁDUAR, M.F.; CAMPOS, M.P.; MAZZILLI, B.P.; VILLAVERDE, F.L. **Assessment of external gamma exposure and radon levels in a dwelling constructed with phosphogypsum plates**. Journal of Hazardous Materials (Print), v.190, p. 1063–1067, 2011

MANOCCHI, F. H., **Monitoração de Rn-222 nos galpões de armazenamento de rejeitos radioativos do IPEN**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MARCINOWSKI, F., LUCAS, R.M., YEAGER, W.M., **National and regional distribution of airborne radon concentrations in U.S. homes**, Health Phys.,

v.66, p. 699–706., 1994

MARQUES, A.L; GERALDO L.P; SANTOS, W., **Níveis de radioatividade natural decorrente do radônio no complexo rochoso da serra de São Vicente, SP.** Radiologia Brasileira, v. 39, n.3, p. 215-218, 2006

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 tree track detectors.** Radiation Protection Dosimetry. v. 77, p. 177-184, 1998

MIRELES, F.; GARCÍA, M.L.; QUIRINO, L.L.; DÁVILA, J.I.; PINEDO, J.L.; RÍOS, C.; MONTERO, M.E.; COLMENERO, L; VILLALBA, L. **Radon survey related to construction materials and soils in Zacatecas, México using LR - 115.** Radiation Measurements 42, p. 1397–1403, 2007

MORAES, M.A.P.V, **Detecção de radônio em solos por meio da técnica de detectores de traços nucleares de estado sólido.** (Dissertação de Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982

NEMAN, R. S., **Medida da contaminação radioativa do ar ambiental por radônio-222 e filhos em residências de Campinas-SP, Brasil.** Campinas, Dissertação de Mestrado. Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Universidade Estadual de Campinas, 2000

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

OMS- Organização Mundial da Saúde- **Handbook on indoor radon, a public health perspective**-France,2009

ONU- Organização das Nações Unidas- Department of Economic and Social Affairs. **World Urbanization Prospects – The 2011 Revision**- United Nations.New York, 2008

ORLANDO C.; ORLAND P.; PATRIZII L; TOMMASINO L, T.; TONNARINI. , R TREVISI ; VIOLA P . **A passive radon dosemeter suitable for workplaces.** Radiation Protection Dosimetry, v.102, p 163-168, 2002

PAES, V.P. **Caracterização radioquímica do ²²⁶Ra, ⁴⁰K e dos isótopos de urânio e tório no fosfogesso.** Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2001

PAPACHRISTODOULOU C.A.; PATIRIS D.L.; IOANNIDES K.G.; **Exposure to indoor radon and natural gamma radiation in public workplaces in north-western Greece,** v. 45, p. 865-871, 2010

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.** Tese (doutorado), Universidade de Campinas, 1991

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, p. 44-46, 1993

PUGLIESI, F., **Caracterização do polímero Durolon como detector de traços nucleares de estado sólido.** Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008

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

SÁNCHEZ A. M.; PÉREZ, J.; DE L.A; SÁNCHEZ, A.B.R.; CORREA F.L. **Radon in workplaces in Extremadura (Spain).** Journal of Environmental Radioactivity, v. 107, p. 86-91, 2012

SABOL, J.; KYSILKO, P.; SESTÁK, B.; PODZIMEK, F.; **Radon Concentration in Sime Specific Locations of Prague Metro Station**, In: 7th International Conference on Protection Against Radon at Home at Work, 2013

SHARMA, N.; VIRK, H.S.; **Exhalation rate study of radon/thoron in some building materials.** Radiation Measurements, v.34, p. 467-469, 2001

SHWEIKANI,R.; RAJA, G.; **Radon exhalation from some finishing materials frequently used in Syria**, Radiation Measurements, v. 44, p. 1019–1023, 2009

SHOEIB, M.Y.; Thabayneh, K.M; **Assessment of natural radiation exposure and radon exhalation rate in various samples of Egyptian building materials.** Journal of Radiation Research and Applied Sciences, v. 7, p. 174-181, 2014

SILVA, A.A.R, YOSHIMURA E.M., **Radon and progeny in the city of São Paulo—Brazil.** Radiation Measurements, V.40, P. 678 – 681, 2005.

SUBILIS, J.B., **NTP 440: Radón en ambientes interiores. Notas Técnicas de Prevención.** Centro Nacional De Condiciones De Trabajo, Espana, 2003

Todorovic N.; Bikit I.; Veskovic M.; Krmar M.; Mrda M.; Forkapic S.; Hansman J.; Nikolov J.; Bikit K. **Radioactivity In The Indoor Building Environment In Serbia.** Radiation Protection Dosimetry, V. 158, p. 208 – 215, 2013

TREVISI,R.; ORLANCO, C.; ORLANDO, P.; AMICI M.; SIMEONI, C.; **Radon levels in underground workplaces e results of a nationwide survey in Italy**, Radiation Measurements, v. 47, p. 178-181, 2012

VILLAYERDE, F.V., **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. 2008

VENTURINI, L., NISTI, M. B., **Natural Radioactivity of some Brazilian building materials**. Radiation Protection Dosimetry, v. 71, p. 227-229, 1997

UNSCEAR, UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources and effects of ionizing radiation**. Vol. 1 (New York: United Nations Publication), 1988

UNSCEAR, UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources and effects of ionizing radiation**. Vol. 1 (New York: United Nations Publication), 2000