

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

**FLÁVIA DEL CLARO**

**PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA MEDIÇÃO DE  
CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO PROVENIENTE DE ROCHAS  
GRANÍTICAS EM MARMORARIAS**

**TESE DE DOUTORADO**

**CURITIBA  
2016**

FLÁVIA DEL CLARO

**PROPOSTA DE PROTOCOLO PARA MEDIÇÃO DE  
CONCENTRAÇÕES DE RADÔNIO PROVENIENTE DE ROCHAS  
GRANÍTICAS EM MARMORARIAS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk

Co-orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

C613p  
2016 Claro, Flávia Del  
Proposta de protocolo para medição de concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias / Flávia Del Claro.-- 2016.  
125 f. : il. ; 30 cm.

Texto em português, com resumo em inglês  
Disponível também via World Wide Web  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2016  
Bibliografia: f. 102-113

1. Radon – Medição. 2. Radiação. 3. Granito. 4. Materiais de construção. 5. Engenharia elétrica – Teses. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich, orient. II. Corrêa, Janine Nicolosi, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Tese Nº. 136

# Proposta de Protocolo Para Medição de Concentrações de Radônio Proveniente de Rochas Graníticas em Marmorarias.

por

**Flávia Del Claro**

**Orientador:** Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk (UTFPR)

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Janine Nicolosi Corrêa (UTFPR)

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia Biomédica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 06 de julho de 2016. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

---

Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk  
(Presidente – UTFPR)

---

Prof. Dr. Sergio Scheer  
(UFPR)

---

Prof. Dr. Vanderley de Vasconcelos  
(CNEN)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Jaqueline Kappke  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Wellington Mazer  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin  
(IPPP)

Visto da Coordenação:

---

Prof. Jean Carlos Cardozo Da Silva, Dr.  
(Coordenador do CPGEI)

## **AGRADECIMENTOS**

Expresso aqui os meus sinceros agradecimentos:

Ao CPGEI pelo curso ofertado.

À CNEN, pelo suporte financeiro.

Ao meu orientador professor Sergei Paschuk pela ajuda e orientação.

À minha co-orientadora professora Janine Nicolosi Corrêa pela orientação, amizade e ajuda.

À Cintia pelo apoio a pesquisa.

Aos professores membros da banca pelas contribuições.

Aos meus pais por tudo o que sou e pela ajuda, carinho e dedicação durante todos esses anos.

Ao meu esposo Alan pela paciência, incentivo e amor.

Ao professor Valeriy pelo auxílio essencial com os cálculos.

A todos os colegas do laboratório pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho, em especial a Aline e ao Luiz.

## RESUMO

DEL CLARO, Flávia. Proposta de protocolo para medição de concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias. 2016. 125 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Radionuclídeos de ocorrência natural como o radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), seus produtos de decaimento e demais elementos provenientes das séries radioativas do urânio ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ) representam importante fonte de exposição humana à radioatividade natural. A avaliação dos efeitos radiobiológicos e dos riscos à saúde decorrentes da exposição da população mundial a radionuclídeos naturais é uma preocupação crescente. Radionuclídeos como o radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), o torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ), o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), o tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) podem ser encontrados em materiais comumente utilizados na construção de casas e edifícios. Nesse panorama, destaca-se o estudo da radioatividade proveniente de mármore e granitos, já que sob certas condições, os níveis de radioatividade exalados desses materiais podem ser nocivos requerendo, assim, a implementação de medidas mitigatórias para a utilização dos mesmos. Este trabalho apresenta um protocolo técnico de controle de exposição humana à radioatividade natural proveniente de rochas graníticas em marmorarias. O protocolo foi elaborado com base em medidas realizadas da concentração dos gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  em rochas graníticas brasileiras que são comumente comercializadas nacionalmente e exportadas. Para as medidas de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  foram utilizados os equipamentos AlphaGUARD (Saphymo GmbH) e RAD7 (DurrIDGE Company), respectivamente. Para as medidas em ambos os equipamentos utilizados, as amostras de granito foram lacradas em frascos de vidro por 40 dias para que os radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  entrassem em equilíbrio secular. As medidas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paralelamente, detectores de estado sólido CR-39 foram instalados nos ambientes de uma marmoraria da região de Curitiba-Paraná para a avaliação das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nos postos de trabalho. Os detectores CR-39 ficaram expostos por um período aproximado de 90 dias e, posteriormente, foram submetidos à revelação química e leitura manual em microscópio óptico. As concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  das amostras de granito analisadas variaram de  $3 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$  a  $2087 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$ . Os resultados obtidos ressaltam a importância dessa pesquisa na contribuição de dados para o fomento de uma legislação nacional que estabeleça valores limites de radioatividade para a comercialização e utilização de rochas graníticas, afim de atender, também, as normas internacionais que limitam o valor de radioatividade aceitável de produtos como mármore e granitos para a importação, exportação e trânsito.

**Palavras-chave:** Radioatividade Natural. Granito. Radônio. Marmoraria. Materiais de Construção.

## ABSTRACT

DEL CLARO, Flávia. Protocol proposal for radon concentration mensuration from granitic rocks in marble factory. 2016. 125 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Naturally occurring radionuclides such as radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), its decay products and other elements from the radioactive series of uranium ( $^{238}\text{U}$  and  $^{235}\text{U}$ ) and thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) are an important source of human exposure to natural radioactivity. The worldwide evaluation of health radiobiological effects and risks from population exposure to natural radionuclides is a growing concern. Radionuclides such as radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), the thoron ( $^{220}\text{Rn}$ ), radio ( $^{226}\text{Ra}$ ), thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) and potassium ( $^{40}\text{K}$ ) may occur in materials commonly used in construction of dwellings and buildings. Thus, the radioactivity from marbles and granites is of importance, so that under certain conditions these materials radioactivity levels can be hazardous requiring the implementation of mitigation measurements. This research presents a technical protocol marble factories for the control human exposure to natural radioactivity exhaled from granitic rocks. The protocol was based on measurements of the  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  concentration in Brazilian granite rocks commonly nationally and exported. The  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  measurements were done using the AlphaGUARD (Saphymo GmbH) and RAD7 (Durrige Company) apparatus, respectively. The samples of granite were sealed in glass jars for 40 days in to achieve secular equilibrium between  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$  radionuclides. The measurements were performed on Applied Nuclear Physics Laboratory at the Federal Technological University of Paraná. Also, solid-state nuclear track detectors CR-39 were installed in a marble factory environments located in Curitiba - Paraná for the evaluation of  $^{222}\text{Rn}$  concentrations in workplaces. The CR-39 detectors were exposed for about 90 days and submitted to etching process. The alpha particle tracks were observed using an optical microscope. Some granite samples analyzed presented  $^{222}\text{Rn}$  concentrations of attention, since the average values ranged from  $3 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$  to  $2087 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$ . The results obtained underscore the importance of this research in the data contribution to the development of national legislation that establishes limits of radioactivity values for marketing and use of granitic rocks. The results also contribute to the Brazilian granite to attend the international standards.

**Keywords:** Natural Radioactivity. Granite. Radon. Marble Factory. Building Materials.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cadeia de decaimento radioativo da série do elemento $^{238}\text{U}$ .....	18
Figura 2 - Cadeia de decaimento radioativo da série do elemento $^{235}\text{U}$ .....	19
Figura 3 - Série de decaimento radioativo do $^{232}\text{Th}$ . ....	20
Figura 4 - Risco de morte por câncer de pulmão em indivíduos de 75 anos fumantes, ex fumantes e não fumantes submetidos a exposições <i>indoor</i> contínuas de radônio no Reino Unido. ....	24
Figura 5 - Percentual de exposição recebida pelo ser humano devido aos tipos de radiação natural e artificial conhecidos.....	28
Figura 6- Modelo dosimétrico do trato respiratório humano. ....	30
Figura 7 - Variedade de cores de granitos brasileiros. ....	33
Figura 8 - Formação das rochas graníticas e composição das rochas ígneas e metamórficas..	34
Figura 9 - Produtos da indústria de rochas. ....	35
Figura 10 - Rocha isótropa - granito Vermelho Brasília (A). Rocha anisótropa - granito Porto Rosa (B).....	36
Figura 11- Principais mecanismos de transporte e liberação do $^{222}\text{Rn}$ de materiais para o ambiente. ....	38
Figura 12 - Concentrações de radônio provenientes de rochas graníticas do estado do Ceará.	42
Figura 13 - Concentrações de radônio obtidas em ambientes internos (5,0m x 4,0m x 2,8m) revestidos com rochas graníticas brasileiras.....	43
Figura 14 - Evolução do faturamento brasileiro entre os anos de 1998 e 2012 no mercado de rochas.....	46
Figura 15 - Critérios chineses para o uso de materiais de construção. ....	48
Figura 16- Bloco de rocha granítica e local de extração de amostra de medida. ....	51
Figura 17 - Amostra de granito identificada.....	52
Figura 18 - Desenho esquemático da planta da marmoraria e seus respectivos ambientes.....	55
Figura 19 - Conjunto de detecção utilizado para medidas de ambientes <i>indoor</i> .....	56
Figura 20 - Vista em corte coronal da câmara de difusão. ....	57
Figura 21 - Detector CR-39. ....	58
Figura 22 - Câmara de difusão numerada para a instalação. ....	58
Figura 23 - Imagem microscópica obtida após a revelação de um detector CR-39. ....	60
Figura 24 – Lâmina de vidro com régua milimétrica para microscópio. ....	62
Figura 25 - Equipamento AlphaGUARD (Saphymo GmbH). ....	64
Figura 26 - Amostras de granitos lacradas em frascos de vidro.....	65
Figura 27 - Desenho esquemático do circuito fechado de medidas realizadas com o AlphaGUARD. ....	67
Figura 28 - Desenho esquemático do circuito de ventilação. ....	68
Figura 29 – Detector eletrônico de radônio RAD7. ....	69
Figura 30 – Desenho esquemático do circuito de medida do RAD7.....	70
Figura 31 – Desenho esquemático do circuito de medida do equipamento RAD7 com o dispositivo DRYSTIK. ....	72



Figura 32– Disposição dos detectores CR-39 durante a exposição dos mesmos no interior dos frascos de vidro.....	73
Figura 33 - Fluxograma das atividades da marmoraria. ....	76
Figura 34 – Características dos traços de detectores CR-39. ....	83
Figura 35 – Características dos traços de detector CR-39 revelado a 90°C.....	86
Figura 36 – Características dos traços de detector CR-39 revelado a 70°C.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos filhos da série de decaimento do gás $^{222}\text{Rn}$ .....	22
Tabela 2 - Progênie do gás $^{220}\text{Rn}$ .....	23
Tabela 3 - Distância percorrida pelas partículas $\alpha$ de energias diferentes .....	27
Tabela 4 - Fatores de peso ( $W_R$ ) atribuídos a radiações e energias diferentes .....	31
Tabela 5 - Limites de recomendação para o rádio equivalente de materiais de construção .....	44
Tabela 6 – Variações de rochas graníticas avaliadas.....	52
Tabela 7 – Variações de rochas graníticas avaliadas.....	53
Tabela 8 – Concentração de $^{222}\text{Rn}$ <i>indoor</i> nos postos de trabalho da marmoraria .....	78
Tabela 9 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados com diferentes tempos.....	81
Tabela 10 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a diferentes tempos de revelação.....	83
Tabela 11 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados em diferentes temperaturas.....	84
Tabela 12 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a diferentes temperaturas de revelação .....	85
Tabela 13 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados com e sem etanol .....	87
Tabela 14 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a revelação com e sem etanol .....	87
Tabela 15 - Concentrações de $^{222}\text{Rn}$ nas amostras de granito medidas com o AlphaGUARD .....	89
Tabela 16 - Concentrações de $^{222}\text{Rn}$ e $^{220}\text{Rn}$ nas amostras de granito medidas com o RAD7 .....	90
Tabela 17 - Concentrações de radônio final nas amostras de granito e contribuição percentual dos gases $^{222}\text{Rn}$ e $^{220}\text{Rn}$ na medida .....	91
Tabela 18- Valores das concentrações de radônio obtidas com os detectores CR-39.....	92
Tabela 19- Valores das concentrações de radônio obtidas com os equipamentos AlphaGUARD, RAD7 e detectores CR-39 .....	93
Tabela 20- Fluxo de exalação de radônio de rochas graníticas .....	95
Tabela 21- Fluxo de exalação de radônio em cômodo padrão .....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS	Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EDTA	<i>Ethylenediamine tetraacetic acid</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	<i>United States of America</i>
EURATOM	<i>The European Atomic Agency Community</i>
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
HPA	<i>Health Protection Agency</i>
HRTM	<i>Human Respiratory Tract Model</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICRP	<i>International Commission on Radiological Protection</i>
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
LET	<i>Linear Energy Transfer</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MINEROPAR	Minerais do Paraná AS
NNDC	<i>National nuclear Data Center</i>
NORM	<i>Naturally Occurring Radioactive Materials</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
SSNTD	<i>Solid State Nuclear Track Detectors</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WHO	<i>World Health Organization</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 MOTIVAÇÕES .....	13
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 ESTRUTURA DA TESE .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 Radionuclídeos naturais.....	17
2.1.1 Radônio-222 e radônio-220 (torônio).....	21
2.2 Dosimetria e efeitos biológicos associados à exposição à radiação natural .....	25
2.3 Rochas graníticas.....	32
2.3.1 Variedade de granitos .....	32
2.3.2 Produtos da indústria de rochas .....	34
2.3.3 Mecanismo de transporte do gás radônio proveniente de rochas graníticas para o ambiente .....	37
2.3.4 Índices de concentração de rádio equivalente .....	39
2.3.5 Normas e posições regulatórias .....	40
2.3.6 Concentrações de <sup>222</sup> Rn em residências .....	41
2.3.7 Mercado interno e externo de rochas graníticas .....	44
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
3.1 Amostras de rochas graníticas .....	50
3.2 Medidas das concentrações de <sup>222</sup> Rn na marmoraria.....	54
3.2.1 Melhoria do processo de revelação de detectores CR-39.....	61
3.3 Estudo das rochas graníticas.....	63
3.3.1 Medidas realizadas com o equipamento AlphaGUARD.....	64
3.3.2 Avaliação das amostras de granito com o equipamento RAD7 .....	69
3.3.3 Avaliação das concentrações de <sup>222</sup> Rn com detector CR-39 .....	72
3.3.4 Fluxo de exalação de radônio .....	74
3.4 Protocolo de controle.....	75
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>78</b>
4.1 Medidas <i>indoor</i> em postos de trabalho da marmoraria .....	78

4.2 Resultados da melhoria do processo de revelação dos detectores CR-39 .....	81
4.3 Medidas das rochas graníticas .....	88
4.4 Medidas do fluxo de exalação de radônio proveniente de rochas graníticas.....	94
4.5 Discussões acerca do Protocolo de Controle .....	96
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>100</b>
5.1 Conclusões gerais .....	100
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	101
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE A – PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO INDOOR EM POSTOS DE TRABALHO DE MARMORARIAS .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE B – PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO PROVENIENTE DE ROCHAS GRANÍTIICAS EM MARMORARIAS .....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE C – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO INDOOR NOS POSTOS DE TRABALHO.....</b>	<b>124</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Diariamente, o ser humano está exposto a diversas fontes de radiações ionizantes naturais e, ao longo dos anos, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de avaliar os efeitos radiobiológicos e riscos à saúde decorrentes da exposição da população mundial a várias fontes de radiação ionizante.

Os radionuclídeos de ocorrência natural presentes nos ambientes são responsáveis pela irradiação externa do ser humano. Já, os radionuclídeos retidos no interior do corpo humano, por meio da ingestão de alimentos, água ou através da inalação dos mesmos, contribuem para a irradiação interna do indivíduo (HOPKE *et al.*, 2000).

Órgãos governamentais, como a *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* - UNSCEAR, desde 1995, avaliam dados epidemiológicos, juntamente com os efeitos da exposição humana a radiações ionizantes, e estabelecem, por meio de seus relatórios, medidas de proteção que são adotadas por vários países como o Brasil (UNSCEAR, 2006; BENNETT, 1996).

O elemento radioativo radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), assim como o seu radioisótopo torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ), é um gás nobre de ocorrência natural que contribui significativamente com a exposição do ser humano a fontes de radiações naturais. Os efeitos biológicos da exposição ao radônio são mundialmente reconhecidos por organismos como a Organização Mundial da Saúde (OMS) que, desde de 1993, evidenciou essa atenção por meio de um encontro entre cientistas e especialistas de vários países para discutir o assunto na época (WHO, 2009).

A radioatividade natural ou ambiental é composta pela radiação cósmica e por radionuclídeos de ocorrência natural no sistema geológico da Terra. Assim, produtos naturais como pedras, areias e minerais contêm quantidades diferentes de elementos radioativos denominados de NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) que, por sua vez, podem representar fontes significativas de radiação, como nos casos em que há a exalação do gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) para a atmosfera (UIEDA e PALEARI, 2003).

Elementos radioativos como o radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), o torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ), o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), o tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) podem ser encontrados em materiais comumente utilizados na construção de casas e edifícios (CSIGE *et al.*, 2013; HASSAN *et al.*, 2011; FATHIVAND *et al.*, 2006; TURHAN *et al.*, 2008). Dentre esses materiais, destacam-se os mármore e granitos, já que sob certas condições de temperatura, umidade, ventilação e pressão atmosférica seus níveis de radioatividade podem contribuir de forma significativa com a concentração de radônio

*indoor*. Assim, medidas de radioproteção preventivas e corretivas devem ser implementadas para a utilização de tais materiais (EL-DINE *et al.*, 2001).

Países como a China e Espanha já mostram preocupação em pesquisar e conhecer os níveis de radioatividade de diferentes tipos de granitos comercializados (XINWEI *et al.*, 2006; GUILLÉN, *et al.*, 2014). Ainda, países do continente europeu, como no caso da Sérvia, estabelecem normas para o controle de radioatividade de produtos como mármore e granitos para a importação, exportação e trânsito (REPUBLIC OS SERBIA, 2011).

De acordo com as regulamentações da Sérvia, mercadorias que apresentem um nível de radiação superior a 20% da radiação ambiente (*background*) não podem entrar no país, de forma que medidas de proteção devem ser adotadas de acordo com as instruções fornecidas pela Agência de Segurança Nuclear e de Proteção contra as Radiações do país (REPUBLIC OS SERBIA, 2011).

No ano de 2008, os Estados Unidos (EUA) noticiaram a existência de problemas referentes aos níveis de radioatividade e de exalação de gás radônio de rochas graníticas utilizadas na construção de bancadas. A notícia repercutiu na preocupação de empresas brasileiras, já que o Brasil é um dos maiores exportadores de rocha para os EUA sendo que, no mesmo ano, os granitos constituíram em torno de 80% do total de rochas exportadas (ABIROCHAS, 2008).

No Brasil, ainda são poucos os estudos voltados à avaliação da radioatividade de rochas graníticas exportadas e comercializadas internamente no país, assim como a avaliação dos níveis de radioatividade recebidos pela população e trabalhadores de marmorarias provenientes de tais materiais (AQUINO, 2015; IRD, 2015; FERREIRA, 2013).

Considerando a falta de legislação nacional específica que estabeleça valores limites de radioatividade para a comercialização e utilização de rochas graníticas e medidas de mitigação para o controle da exposição humana a essa radiação, este trabalho tem por objetivo estabelecer uma proposta de protocolo para medição das concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias.

## 1.1 MOTIVAÇÕES

Na comunidade científica é aceita e difundida a ideia de que o radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), seus produtos de decaimento e os demais elementos radioativos provenientes das séries radioativas naturais do urânio ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ) constituem importante fonte de exposição

humana a radioatividade natural. Recentemente, a *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), em sua publicação de número 126, ratificou a informação de que a exposição ao  $^{222}\text{Rn}$  pode provocar o desenvolvimento de câncer pulmonar (ICRP, 2014).

O aumento do número de trabalhos científicos sobre o assunto demonstra a preocupação com a exposição do ser humano, principalmente ao gás  $^{222}\text{Rn}$  (UNSCEAR, 2000), e estabelece a questão da radioatividade como um problema de saúde pública.

No Brasil, não há legislação que estabeleça valores limites de referência quanto às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  provenientes de rochas graníticas. Contudo, a norma 3.01 da CNEN (CNEN, 2014) prevê limites de doses anuais individuais, de forma que nos valores limites de dose efetiva são consideradas as fontes de exposições externas.

Todavia, a utilização de alguns materiais na construção civil como o fosfogesso já é regulamentada pela CNEN que estabelece, em sua norma 189/15, concentrações máximas de rádio ( $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ ) permitidas para que não haja aumento significativo das doses de radiação para a população (CNEN, 2015).

A Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (FUNDACENTRO), em seu documento intitulado “Marmorarias - Manual de Referência-Recomendações de Segurança e Saúde no Trabalho”, prevê recomendações técnicas e medidas de controle que visam evitar a exposição dos trabalhadores à agentes químicos, ao ruído, à riscos ergonômicos e ambientais nos ambientes de trabalho de marmorarias. Porém, o manual não contempla medidas de avaliação e controle à exposição dos trabalhadores à radioatividade natural proveniente das rochas graníticas (FUNDACENTRO, 2008).

O estudo da exposição humana a níveis de radioatividade proveniente de rochas graníticas brasileiras em marmorarias é uma pesquisa de caráter inovador, assim como a elaboração de proposta de protocolo de controle que vise reduzir a exposição, inclusive de trabalhadores, a radiação proveniente desses materiais.

Além disso, a proposta e implementação de medidas de mitigação se fazem necessárias em alguns casos de exportação dos granitos para que esses materiais possam ser exportados a outros países, de forma a atender a legislação internacional de segurança que dita os níveis de radioatividade aceitáveis para a entrada, circulação e comercialização de produtos estrangeiros.

Assim, no interesse de conhecer os níveis de radioatividade de rochas graníticas brasileiras e de propor um protocolo de controle para medição das concentrações do gás radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias apresenta-se esta pesquisa.



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Elaborar uma proposta de protocolo para medição das concentrações de radônio ( $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ ) provenientes de rochas graníticas brasileiras comercializadas por marmorarias.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  em postos de trabalho de marmoraria através do uso de detectores CR-39.
- Realizar medidas das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  provenientes de rochas graníticas por meio do uso do equipamento RAD 7.
- Verificar as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  de rochas graníticas com o equipamento AlphaGUARD e comparar os resultados com as medidas de  $^{222}\text{Rn}$  obtidas com o equipamento RAD7.
- Propor melhorias no tempo e temperatura do processo de revelação de detectores CR-39 adotado pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), através do estudo da influência do tempo, da temperatura e da solução reveladora no processo de revelação, a fim de otimizar o processo de revelação tornando-o mais rápido e melhorando a qualidade dos traços revelados no detector CR-39.
- Calcular o fluxo de exalação de radônio por unidade de área das rochas graníticas.
- Estimar a contribuição de radônio proveniente dos granitos para ambientes *indoor*.

## 1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese está organizada em capítulos conforme descrição abaixo:

No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução acerca do tema do trabalho juntamente com a problemática que permeia o tema objeto de estudo, as motivações para a realização do trabalho, e os objetivos geral e específicos que relatam a pretensão desta pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre o tema de estudo por meio da reunião de trabalhos científicos da área, apresentando informações relevantes que embasam os procedimentos metodológicos empregados nesta pesquisa.

Já, o capítulo 3 trata detalhadamente dos materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 4 são expostos os resultados obtidos, os quais são discutidos e comparados com dados da literatura.

O capítulo 5 reúne as considerações finais acerca dos resultados deste trabalho, bem como, as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final do trabalho são apresentadas as referências utilizadas no decorrer da pesquisa, assim como os apêndices A, B e C com detalhes técnicos do estudo realizado.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Radionuclídeos naturais

A radioatividade natural é proveniente dos raios cósmicos e de elementos radioativos de ocorrência natural na natureza. Os elementos radioativos de ocorrência natural (NORM) são classificados em primordiais e cosmogênicos em relação à sua origem. Os radionuclídeos primordiais datam do surgimento da Terra, aproximadamente 4,6 bilhões de anos, já que apresentam uma meia-vida longa (UIEDA e PALEARI, 2003), e seus produtos de decaimento estão presentes na natureza em quantidades suficientes para contribuir significativamente com a exposição da população (UNSCEAR, 2008).

Já, os elementos ditos cosmogênicos são aqueles originados do processo de bombardeio entre núcleos estáveis presentes na atmosfera e raios cósmicos. Como resultado dessa interação surgem elementos radioativos como o carbono ( $^{14}\text{C}$ ), o sódio ( $^{22}\text{Na}$ ), o berílio ( $^7\text{Be}$ ) e o trítio ( $^3\text{H}$ ) (EISENBUD e GESSEL, 1997; UNSCEAR, 2000).

Dentre os radionuclídeos primordiais conhecidos destacam-se, devido ao interesse de estudo, por parte da dosimetria, da exposição humana à radiação natural, o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) e os elementos pertencentes às cadeias de decaimento radioativo das séries do urânio ( $^{238}\text{U}$ ), do tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e do urânio ( $^{235}\text{U}$ ) (EISENBUD e GESSEL, 1997).

Um dado importante para a avaliação da exposição humana à radiação natural é a meia-vida do radionuclídeo, a qual corresponde ao tempo necessário para que o número de átomos do elemento radioativo diminua pela metade de seu valor inicial.

As Figuras 1, 2 e 3 ilustram as séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{235}\text{U}$ , respectivamente, assim como os radionuclídeos e nuclídeos estáveis pertencentes a cada uma delas.

A UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) já relata em seus relatórios datados de 1962 que os elementos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  podem ser encontrados em grandes quantidades em vários países como a Austrália, Canadá, Estados Unidos, no sul da África, Brasil entre outros locais, sendo que uma quantidade significativa desses radionuclídeos naturais está concentrada em rochas graníticas. O  $^{40}\text{K}$  também é relativamente abundante na natureza (UNSCEAR, 1962).

Na natureza é possível encontrar três isótopos de urânio:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ . Na crosta terrestre o  $^{238}\text{U}$  é o mais abundante (99,28%), seguido dos isótopos  $^{235}\text{U}$  (0,71%) e  $^{234}\text{U}$  (0,0058%). Nas rochas ígneas ácidas a concentração de urânio é cerca de 100 vezes maior do

que a concentração presente nas rochas ígneas ultrabásicas. Como o urânio está presente em solos e fertilizantes, o mesmo pode ser encontrado, também, em alimentos e, conseqüentemente, em tecidos humanos (EISENBUD e GESSEL, 1997).

Alguns estudos demonstram que órgãos como os pulmões, rins e ossos podem receber uma alta dose anual decorrente da concentração de urânio no organismo que fica retido, principalmente no esqueleto. De acordo com dados da UNSCEAR, um percentual de 70% de todo o  $^{238}\text{U}$  presente no corpo concentra-se nos ossos (UNSCEAR, 2000).

Um estudo realizado em 1987, para a população residente nas regiões dos Estados Unidos e Canadá, já estimou na época que a dose anual de radiação a que alguns órgãos do corpo humano estavam expostos, variavam de 6,4 a 11 microsievert ( $\mu\text{Sv}$ ) (NCRP, 1987 *apud* EISENBUD e GESSEL, 1997).

A preocupação em relação à presença de urânio no organismo não gira somente em torno da toxicidade radiológica desse elemento, mas também se dá pelo fato do urânio ser um metal dito nefrotóxico, ou seja, que prejudica o funcionamento normal dos rins (VASCONCELOS, 2010).

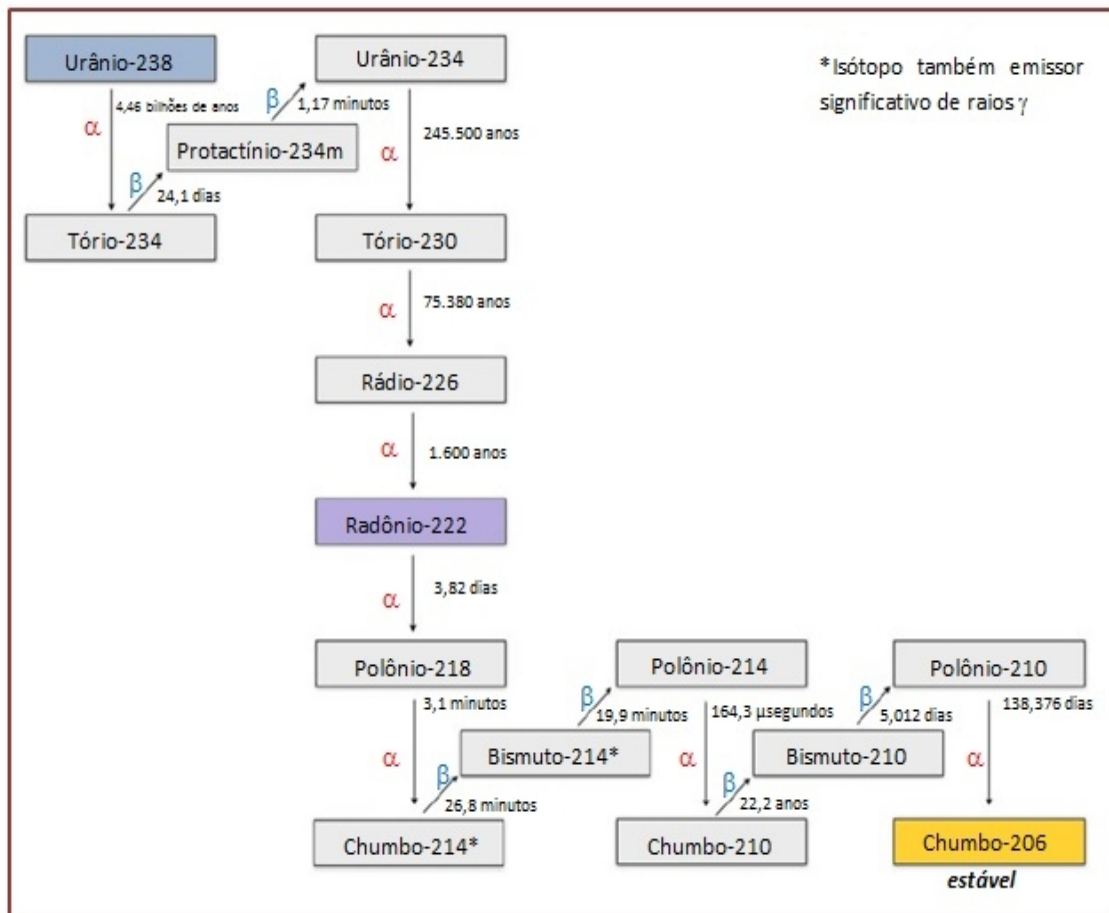


Figura 1 - Cadeia de decaimento radioativo da série do elemento  $^{238}\text{U}$ .

Fonte: Adaptado de ICRP (2014)

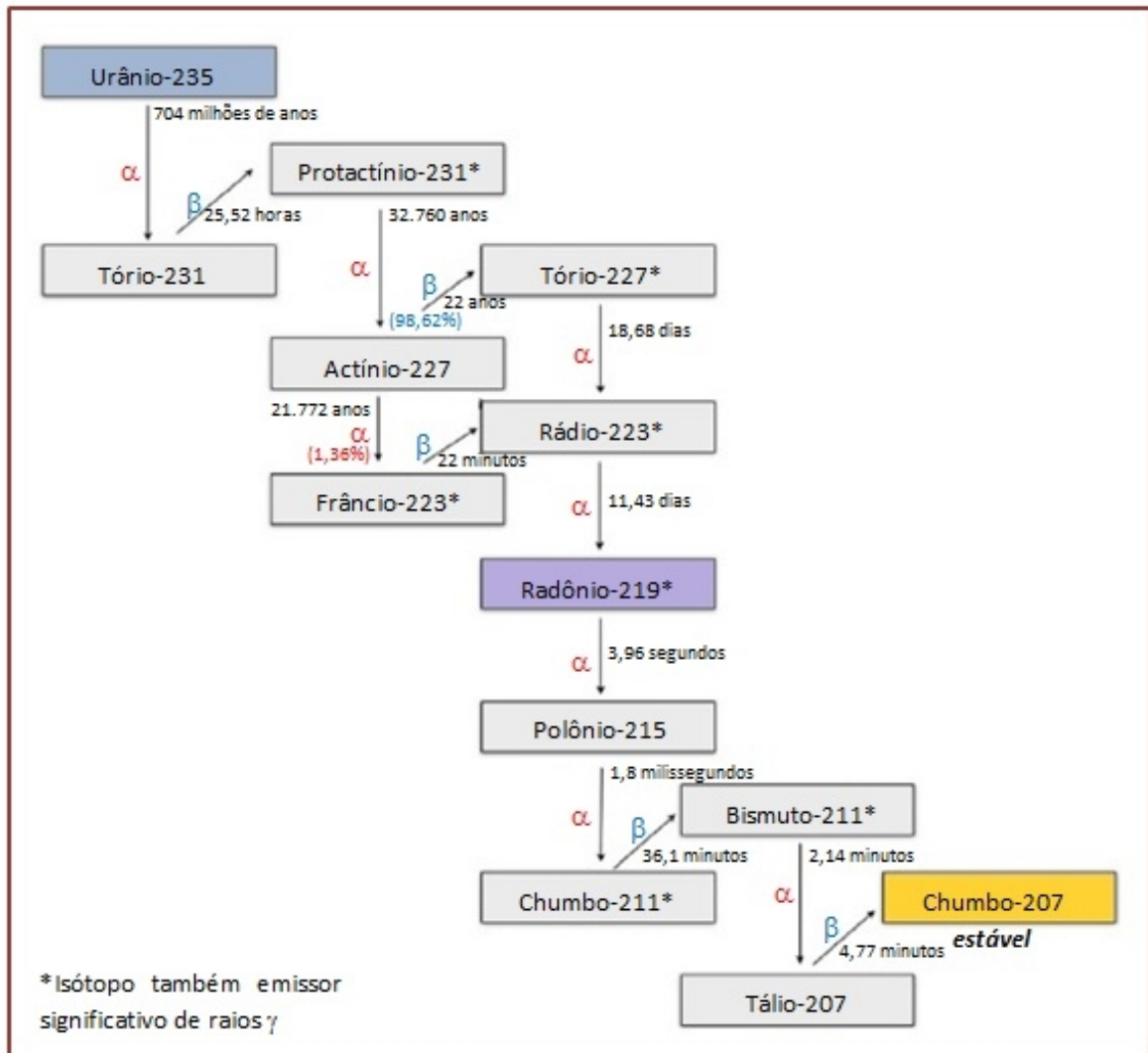


Figura 2 - Cadeia de decaimento radioativo da série do elemento  $^{235}\text{U}$ .

Fonte: Adaptado de ICRP (2014)

Outro radionuclídeo de interesse científico é o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), já que este juntamente com os seus produtos de decaimento são responsáveis por uma grande fração da dose de radiação interna recebida pelo ser humano (EISENBUD e GESSEL, 1997; UNSCEAR, 2008).

O  $^{226}\text{Ra}$  faz parte da cadeia radioativa do  $^{238}\text{U}$  (Figura 1) e no seu processo de decaimento radioativo origina o radionuclídeo  $^{222}\text{Rn}$ .

Ao ser inalado, o  $^{222}\text{Rn}$  deposita diretamente nos tecidos pulmonares dose de radiação devido a emissão de partículas alfa ( $\alpha$ ) decorrentes do processo de desintegração radioativa aumentando, assim, a probabilidade do aparecimento de um câncer pulmonar radioinduzido (ADEMOLA, 2008 *apud* HASSAN *et al.*, 2011).

Basicamente, o  $^{226}\text{Ra}$  pode ser encontrado em todos os tipos de rochas, mas em

quantidades variáveis. Normalmente, as rochas ígneas tendem a conter concentrações mais elevadas de rádio do que os arenitos e os calcários (EISENBUD e GESSEL, 1997).

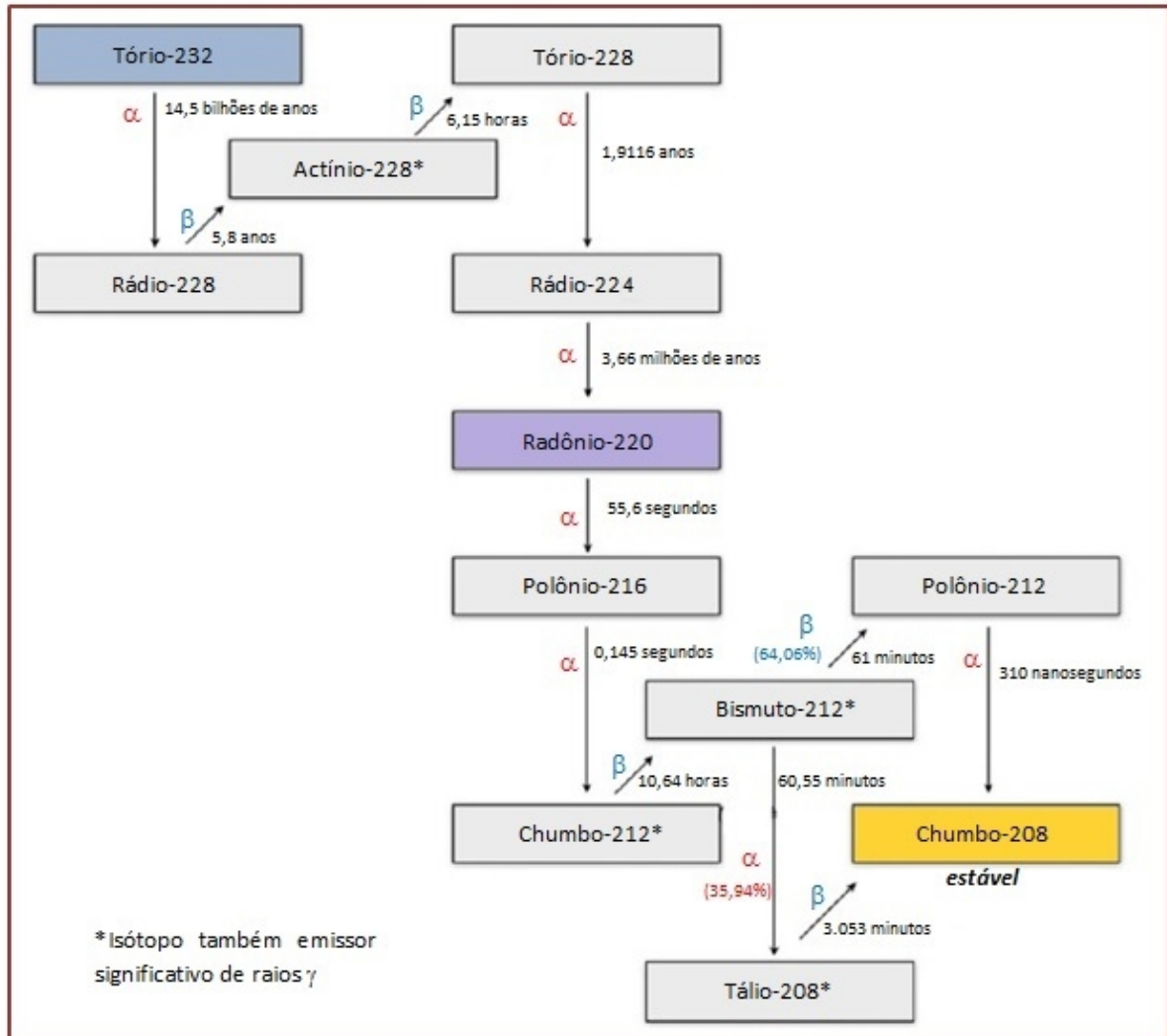


Figura 3 - Série de decaimento radioativo do  $^{232}\text{Th}$ .

Fonte: Adaptado de ICRP (2014)

Já, o  $^{232}\text{Th}$  é um radionuclídeo presente normalmente em materiais como areia monazítica, rochas e em alguns minerais (CAMARGO, 1994). Na série de decaimento do  $^{232}\text{Th}$  destaca-se a formação do isótopo do radônio de número de massa 220, mais comumente conhecido como torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) que possui uma meia-vida aproximada de 55 segundos.

O  $^{40}\text{K}$  é o único isótopo radioativo de potássio de ocorrência natural e constitui, aproximadamente, 0,0117% do total de potássio presente na natureza. Esse radionuclídeo emissor de radiação beta ( $\beta$ ) e gama ( $\gamma$ ) juntamente com os produtos de decaimento das séries do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  são os principais contribuintes da radioatividade natural de rochas

(VASCONCELOS, 2010). O  $^{40}\text{K}$  concentra-se preferencialmente em rochas ígneas ácidas (VASCONCELOS *et al.*, 1994 *apud* VASCONCELOS, 2010).

Os materiais utilizados para a construção de residências contribuem de maneira expressiva para a dose de exposição dos indivíduos devido a emissão de raios gama e partículas alfa provenientes de radionuclídeos como o  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  (ADEMOLA, 2008 *apud* HASSAN *et al.*, 2011).

Ainda, alguns materiais incluindo granito, concreto e subprodutos de diferentes indústrias podem contribuir com uma grande fração do total das concentrações *indoor* (em ambientes internos) de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) e torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) (HASSAN *et al.*, 2011).

Segundo a UNSCEAR, a exposição *indoor* depende, principalmente, da concentração dos radionuclídeos presentes no solo e em materiais de construção. Em geral, a quantidade de radionuclídeos naturais é mais elevada em materiais de construção do que nos solos, sendo que o granito e o mármore apresentam elevados valores médios de rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ) (77 Bq/kg). No caso do granito, os valores médios de concentração de  $^{232}\text{Th}$  (84 Bq/kg) e  $^{40}\text{K}$  (1200 Bq/kg) também são representativos (UNSCEAR, 2008).

### 2.1.1 Radônio-222 e radônio-220 (torônio)

O  $^{222}\text{Rn}$  é um gás nobre radioativo de ocorrência natural originado do processo de decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ . Esses dois radionuclídeos fazem parte da série radioativa do  $^{238}\text{U}$  que se mostra presente no solo e nas rochas da superfície terrestre (CELA, 2014). Similarmente, o  $^{224}\text{Ra}$ , que é descendente da série do  $^{232}\text{Th}$ , decai por emissão de partícula alfa ( $\alpha$ ) gerando um isótopo do radônio denominado de torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ). Contudo, diferentemente do  $^{222}\text{Rn}$ , que tem uma meia-vida aproximada de 3,8 dias, o torônio apresenta uma meia-vida curta de apenas 54 segundos (WHO, 2011; EISENBUD e GESSEL, 1997).

Todos os isótopos de radônio são gases nobres e possuem a característica de serem moléculas monoatômicas inertes. Todavia, o radônio pode se agregar a partículas em suspensão no ar e, assim, ser inalado (CELA, 2014; EISENBUD e GESSEL, 1997).

No processo de decaimento do gás  $^{222}\text{Rn}$  são emitidas partículas alfa ( $\alpha$ ) de energias bem definidas, que variam de 4 a 7 MeV (mega elétron-volt), e uma série de elementos filhos, ou seja, produtos de decaimento são produzidos, conforme mostra a Tabela 1. Assim, dentro das vias aéreas uma série de outros radionuclídeos são gerados a partir do decaimento do radônio. No caso do  $^{222}\text{Rn}$ , a maioria dos elementos descendentes (filhos) possuem uma meia-

vida relativamente curta, e ao final da cadeia de decaimento tem-se como nuclídeos estável o chumbo ( $^{206}\text{Pb}$ ) que é um metal pesado.

Tabela 1 - Elementos filhos da série de decaimento do gás  $^{222}\text{Rn}$

Nuclídeos	Meia-vida ( $T_{1/2}$ )	Modo de decaimento
$^{222}\text{Rn}$	3,8 dias	$\alpha$ (100%)
$^{218}\text{Po}$	3,1 minutos	$\alpha$ (99,98%) $\beta^-$ (0,02%)
$^{214}\text{Pb}$	26,8 minutos	$\beta^-$ (100%)
$^{214}\text{Bi}$	19,9 minutos	$\alpha$ (0,02%) $\beta^-$ (99,98%)
$^{214}\text{Po}$	164,3 $\mu$ segundos	$\alpha$ (100%)
$^{210}\text{Pb}$	22,2 anos	$\beta^-$ (100%)
$^{210}\text{Bi}$	5,0 dias	$\beta^-$ (100%)
$^{210}\text{Po}$	138,376 dias	$\alpha$ (100%)
$^{206}\text{Pb}$	<b>estável</b>	-

Fonte: Adaptado de NNDC (2015)

Mediante a inalação do gás  $^{222}\text{Rn}$ , as partículas  $\alpha$ , assim como os demais radionuclídeos gerados pelo decaimento do radônio, podem interagir com o tecido biológico do trato respiratório provocando danos ao DNA (ácido desoxirribonucleico) das células. Esses danos ou mutações no material genético das células podem acarretar no desenvolvimento de tumores ou câncer pulmonar (WHO, 2011).

De maneira análoga, no decaimento do torônio, também são emitidas partículas ionizantes que podem interagir com os tecidos pulmonares causando danos. Contudo, considerando que a meia-vida do torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) é da ordem de dezenas de segundos, a detecção da concentração desse gás no ambiente é mais difícil, assim como a sua inalação pelo homem. Todavia, a exposição ao  $^{220}\text{Rn}$  em ambientes *indoor* vem recebendo atenção crescente nos últimos anos pela sua progênie (ICRP, 2014).

Na cadeia de decaimento do  $^{220}\text{Rn}$  vários radionuclídeos de diferentes meias-vidas são gerados. Ao final da série radioativa, o elemento chumbo ( $^{207}\text{Pb}$ ) é o nuclídeo estável encontrado. A Tabela 2 mostra características do elemento  $^{220}\text{Rn}$  e de sua progênie.



Tabela 2 - Progênie do gás  $^{220}\text{Rn}$ 

Nuclídeos	Meia-vida ( $T_{1/2}$ )	Modo de decaimento
$^{220}\text{Rn}$	55,6 segundos	$\alpha$ (100%)
$^{216}\text{Po}$	0,145 segundos	$\alpha$ (100%)
$^{212}\text{Pb}$	10,64 horas	$\beta^-$ (100%)
$^{212}\text{Bi}$	60,55 minutos	$\beta^-$ (64,06%) $\alpha$ (35,94%)
$^{212}\text{Po}$ (64%) $^{208}\text{Tl}$ (36%)	0,299 $\mu$ segundos / 3,053 minutos	$\alpha$ (100%) / $\beta^-$ (100%)
$^{208}\text{Pb}$	estável	-

Fonte: Adaptado de NNDC (2015)

Já, a meia-vida do isótopo do radônio  $^{219}\text{Rn}$ , pertencente à série de decaimento do  $^{235}\text{U}$ , é muita curta, já que corresponde a 4 segundos, aproximadamente. Assim, A contribuição do  $^{219}\text{Rn}$  para a exposição humana é considerada insignificante (ICRP, 2014).

Como o radônio e o torônio pertencem a séries de decaimentos diferentes, a taxa de exalação de cada um, a partir de materiais de construção como rochas graníticas, assim como de seus produtos de decaimento, dependerá, em parte, da concentração de urânio e tório presentes no material (UNSCEAR, 2006).

Segundo documento publicado no ano de 2010 pela *Health Protection Agency* do Reino Unido (HPA, 2010), a afirmação de que a exposição ao radônio pode levar ao desenvolvimento de câncer pulmonar é baseada em fortes evidências decorrentes de estudos epidemiológicos acerca da exposição de mineiros ao radônio, de experimentos com animais e de cálculos dosimétricos.

O radônio é considerado o segundo principal agente causador de câncer de pulmão após o cigarro (UNSCEAR, 2000; ICRP, 2014). Além disso, a probabilidade do aparecimento de câncer de pulmão associada à exposição ao radônio é maior em indivíduos que fumaram em parte ou ao longo de suas vidas do que em pessoas não fumantes (ICRP, 2014). Na Figura 4 é apresentado um gráfico que relaciona a probabilidade da mortalidade por câncer de pulmão com a exposição ao radônio prolongada por 75 anos de indivíduos fumantes, ex-fumantes e não fumantes.

De acordo com as informações apresentadas pelo gráfico da Figura 4 é possível inferir que o risco de morte por câncer pulmonar é maior em indivíduos expostos a concentrações maiores de radônio. Ainda, é possível observar que o risco de morte por câncer associado ao radônio também é maior nos casos dos indivíduos fumantes e ex-fumantes.

O *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), em sua publicação de nº 126, sugere a adoção nacional de um valor de referência limite para o radônio *indoor* de 300

Bq/m<sup>3</sup>, o qual corresponderia a uma dose anual alta, mas ainda dentro dos limites de 1 a 20 mSv (ICRP, 2014).

De acordo com a ICRP, o valor de 300 Bq/m<sup>3</sup> atende os padrões básicos de normas de segurança preconizados por agências como a *International Atomic Energy Agency* (IAEA), *United Nations Environment Programme* (UNEP), *World Health Organization* (WHO), *The European Atomic Agency Community* (EURATOM), entre outras. A ICRP afirma, ainda, que o limite de referência de radônio deve ser aplicado em construções de uso misto que são utilizadas tanto por indivíduos do público quanto por trabalhadores (ICRP, 2014).

O gás <sup>222</sup>Rn apresenta características que influenciam tanto no valor quanto na região da concentração *indoor* desse radionuclídeo. Uma delas é o fato do gás <sup>222</sup>Rn ser cerca de oito vezes mais pesado que o ar, o que propicia um maior acúmulo do gás em ambientes a uma altura próxima do solo, que corresponde ao nível do ar respirado pelos seres humanos o que facilita a inalação do <sup>222</sup>Rn. Além disso, o <sup>222</sup>Rn é praticamente insolúvel em água, característica esta que também facilita o transporte do gás presente em meio líquido para o ambiente (HOPKE *et al.*, 2000).

A concentração *indoor* de <sup>222</sup>Rn varia no decorrer do dia, já que fatores ambientais como temperatura, pressão atmosférica, fluxo de ventilação e umidade influenciam na taxa de exalação (NEMAN, 2000).

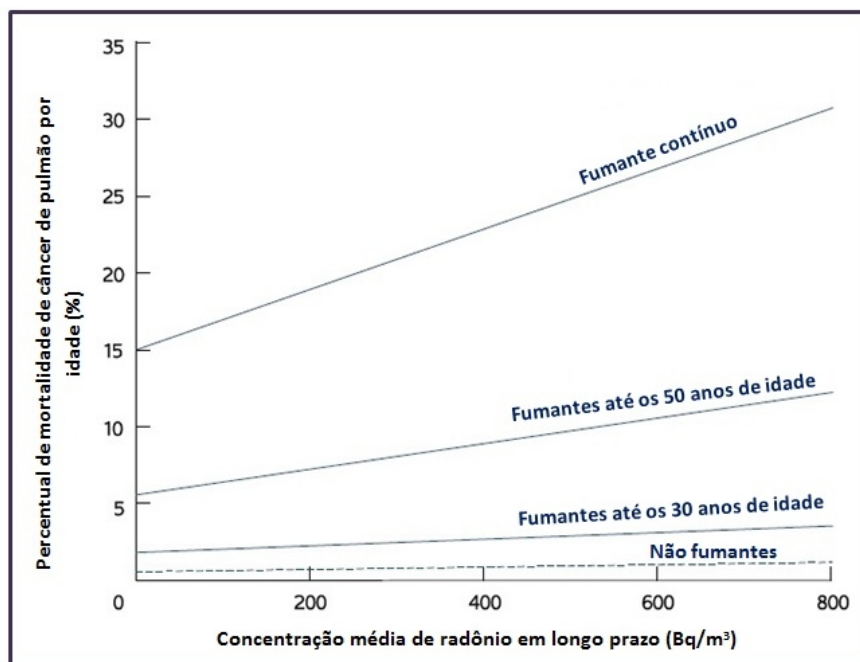


Figura 4 - Risco de morte por câncer de pulmão em indivíduos de 75 anos fumantes, ex-fumantes e não fumantes submetidos a exposições *indoor* contínuas de radônio no Reino Unido.

Fonte: Adaptado de HPA (2010)

De acordo com Neman (2000), a mobilidade do  $^{222}\text{Rn}$  é dependente de fatores meteorológicos (temperatura, pressão e umidade) e de fatores como a ventilação e a existência de campos eletrostáticos. Tais fatores devem ser considerados no estudo dos níveis de concentração *indoor* do gás radônio, assim como na elaboração de medidas de mitigação.

Estudos mostram, por exemplo, que as concentrações do  $^{222}\text{Rn}$  em ambientes externos podem variar durante o dia em um fator da ordem de 10. Em alguns locais, a noite e no início da manhã, há condições de inversão atmosférica (temperatura) que fazem com que o radônio tenda a ficar concentrado mais próximo do chão. Variações sazonais, que provocam mudanças nos ventos, também podem influenciar nas concentrações do gás radônio. Embora os dados sobre a variação das concentrações de torônio sejam relativamente esparsos quando comparados com os estudos acerca do  $^{222}\text{Rn}$ , os estudiosos da área assumem que há uma variabilidade considerável das concentrações de torônio entre um local e outro, principalmente devido a curta meia-vida desse radionuclídeo, que amplifica os efeitos das variações locais da taxa de exalação do gás (UNSCEAR, 2006).

Por ser tratar de um gás inodoro, incolor e insípido, o  $^{222}\text{Rn}$  só pode ser detectado por meio de equipamentos específicos (CELA, 2014; WHO, 2011).

## 2.2 Dosimetria e efeitos biológicos associados à exposição à radiação natural

Há anos, os riscos biológicos associados a exposição às radiações ionizantes são conhecidos pela comunidade científica. Episódios como o uso do radionuclídeo rádio em tintas luminosas na época da I Guerra Mundial, e em período subsequente à mesma, chamaram a atenção para os riscos e efeitos decorrentes do uso desse elemento, principalmente quando o mesmo era inalado e ingerido acidentalmente e/ou por ignorância (MARTLAND, 1925; EVANS *et al.*, 1969).

Radiações ionizantes caracterizam-se por terem energia suficiente para interagir e ionizar átomos e moléculas do meio em que se encontram ou são aplicadas. O processo de ionização provoca mudanças nos átomos e moléculas presentes no meio podendo, assim, acarretar em consequências em curto prazo ou, ainda, tardias (UNSCEAR, 1993).

Na ação direta, a radiação interage com o DNA (ácido desoxirribonucleico) e danifica sua estrutura. Tal interação pode provocar o aparecimento de anormalidades cromossômicas. Diferentemente, na ação dita indireta, a radiação não interage diretamente com a estrutura do DNA, mas sim com as moléculas de água presentes no organismo de forma a originar um

processo denominado de radiólise. Na radiólise, a radiação ioniza a molécula de água quebrando-a, e como resultado dessa quebra tem-se a formação de radicais livres, também chamados de componentes reativos que são capazes de interagir com demais moléculas do meio podendo causar danos irreversíveis (UNSCEAR, 1993; TILLY JUNIOR, 2010; OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

Além da interação com o DNA, a radiação ionizante também pode causar danos estruturais e/ou funcionais em demais componentes ou organelas celulares (UNSCEAR, 2006).

Quando danos celulares ocorrem, devido à exposição às radiações ionizantes, o reparo da célula danificada pode não acontecer de maneira adequada podendo, assim, impedir a sobrevivência da célula ou, ainda, modificá-la. Apesar de existirem mecanismos de reparos celular, nem sempre os mesmos são totalmente eficazes. Tanto as mortes das células como a modificação celular acarretam diferentes implicações para o organismo humano (UNSCEAR, 1993).

Nos casos em que a radiação provoca a modificação da célula ao invés da morte celular, as mutações gênicas podem ser transmitidas às células filhas, nos processos de multiplicação e renovação celular, e dar origem a tumores (UNSCEAR, 1993).

Os efeitos biológicos nas células somáticas, decorrentes da exposição à radiação, podem ser manifestados ao longo da vida do indivíduo ou, ainda, os efeitos podem ser transmitidos entre gerações por meio das células germinativas (TILLY JUNIOR, 2010; OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

Os efeitos das ações diretas e indiretas são probabilísticos, sendo que a probabilidade de ocorrência dos efeitos aumenta para doses de radiação e volume do alvo maior. Assim, é importante considerar a natureza probabilística dos efeitos biológicos associados à exposição à radiação, já que danos na estrutura do DNA também podem ser decorrentes de outras causas como, por exemplo, erros aleatórios de replicação na divisão celular (UNSCEAR, 1993).

Os radionuclídeos pertencentes às séries do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  emitem no seu processo de decaimento partículas alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) e radiação gama ( $\gamma$ ) que possuem energia suficiente para ionizar o meio com o qual interagem. A transferência linear de energia (LET), ou seja, a quantidade de energia que é depositada ou transferida de acordo com a distância percorrida pela radiação, é diferente entre as partículas e os fótons (TILLY JUNIOR, 2010; OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

O grau de mutação celular é diferente para radiações de alto e baixo LET. Geralmente, radiações de alto LET, como no caso das partículas  $\alpha$  provenientes do radônio, provocam mais

quebras do DNA devido à energia da partícula  $\alpha$  que é transferida para os tecidos (UNSCEAR, 2006).

A capacidade de deposição de energia e de ionização dos tecidos biológicos da radiação proveniente dos radionuclídeos de ocorrência natural, presentes no solo, água e materiais de construção, reforça a necessidade da preocupação com a exposição do ser humano à radiação natural.

O alcance das partículas  $\alpha$  é dependente da energia apresentada pelas mesmas. Essa relação pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Distância percorrida pelas partículas  $\alpha$  de energias diferentes

Energia partícula $\alpha$ (MeV)	Alcance no ar (cm)
1,0	0,55
2,0	1,0
3,0	1,8
4,0	2,6
5,34	3,9

Fonte: Adaptado de OKUNO e YOSHIMURA (2010)

Estudos anteriores demonstraram o aparecimento de aberrações cromossômicas em trabalhadores de minas de urânio. Para mineiros que trabalharam de 1 a 20 anos, a exposição acumulada foi estimada entre 10 e 5.400 WLM (*working level month*) (UNSCEAR, 2006).

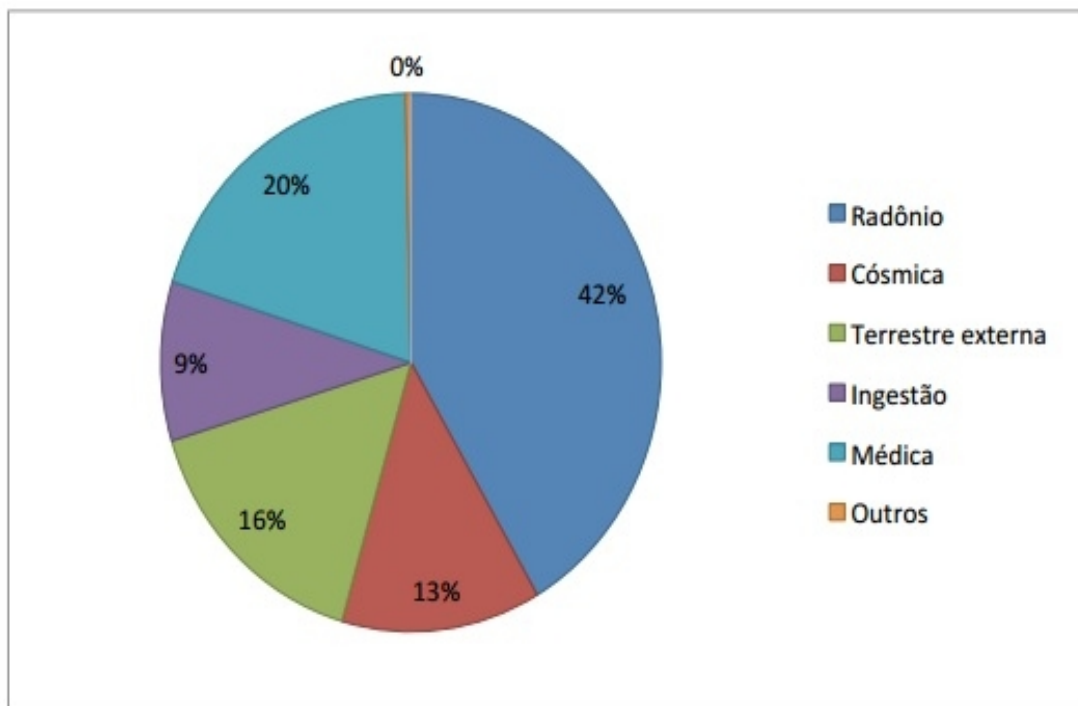
Pesquisas realizadas com mineradores de urânio na Alemanha foram realizadas com o objetivo de identificar especificamente qual é o defeito genético causado pela radiação  $\alpha$  que leva ao desenvolvimento de câncer de pulmão. Contudo, os pesquisadores não conseguiram identificar mutação no gene p53 supressor de tumor, o que é característico nos casos de câncer induzidos pelo radônio (UNSCEAR 2006).

No caso do radônio, estudos demonstram que somente o radônio e seus produtos de decaimento são responsáveis por, aproximadamente, metade da dose efetiva que é recebida pela população mundial proveniente de fontes de radioatividade de ocorrência natural, conforme ilustra a Figura 5.

Ainda, dados provenientes de estudos da exposição ao radônio constituem evidências de que a exposição em longo prazo a concentrações de radônio inferiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> já

apresentam risco de desenvolvimento de câncer de pulmão (ICRP, 2010).

Normalmente, o indivíduo com neoplasia pulmonar apresenta poucos sintomas, de forma que a doença já se encontra em estágio avançado quando diagnosticada. Assim, o prognóstico, ou seja, a previsão do provável curso da doença dependerá do estágio e do tipo histológico da neoplasia (SES-MG, 2013). Segundo o Instituto Nacional de Câncer (INCA), o termo estágio é utilizado na prática médica para descrever a gravidade ou extensão do câncer (INCA, 2016).



**Figura 5 - Percentual de exposição recebida pelo ser humano devido aos tipos de radiação natural e artificial conhecidos.**

**Fonte: KAPPKE (2013) adaptado de UNSCEAR (2008)**

A *International Agency for Research on Cancer* (IARC), que é uma agência especializada em estudo de câncer da Organização Mundial de Saúde (WHO), atualiza e divulga periodicamente as substâncias que são consideradas ou não um potencial carcinogênico dividindo-as em 4 grupos de risco. As radiações ionizantes e, conseqüentemente, o  $^{222}\text{Rn}$  estão inseridas no Grupo 1, que contempla os agentes carcinógenos para os seres humanos (IARC, 2014; IARC 2006). A carcinogênese é determinada da exposição do homem, em uma dada frequência e período de tempo, a agentes e pela interação entre eles (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 1996).

Segundo a classificação da IARC, o Grupo 1 corresponde a uma categoria utilizada

quando há evidências concretas e suficientes de que uma substância ou agente é carcinógeno. Tais evidências são baseadas em experimentos realizados com animais e de estudos da exposição humana às ações do agente (IARC 2006).

Estudos epidemiológicos atribuem a exposição à radiação  $\gamma$  ao aparecimento de tumores em estruturas como glândulas salivares, tireóide, pulmões, mama, estômago, esôfago, entre outros. A exposição ao  $^{222}\text{Rn}$  e seus produtos de decaimento estão relacionadas ao desenvolvimento de câncer de pulmão, leucemia (câncer que afeta os glóbulos brancos do sangue) e/ou linfoma (câncer nos linfonodos – gânglios) (IARC, 2014).

Os radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{224}\text{Ra}$ , juntamente com sua progênie, estão associados ao desenvolvimento de câncer nos seios paranasais e ossos. Já o  $^{232}\text{Th}$  pode contribuir no aparecimento de tumores malignos dos ductos biliares e fígado (COGLIANO *et al.*, 2011).

A dose absorvida ( $D$ ) é uma grandeza física utilizada para quantificar a energia média cedida pela radiação ionizante por unidade de massa de um material. No Sistema Internacional a dose absorvida é dada em joule por quilograma (J/kg), podendo também ser utilizada a unidade gray (Gy) (ICRP, 2012).

As estimativas de dose absorvida pelas células do trato respiratório expostas ao radônio podem ser delineadas a partir de informações como taxa de respiração do indivíduo, tamanho das partículas de aerossol e sua distribuição, fração de deposição nas vias aéreas, entre outros (UNSCEAR, 2010).

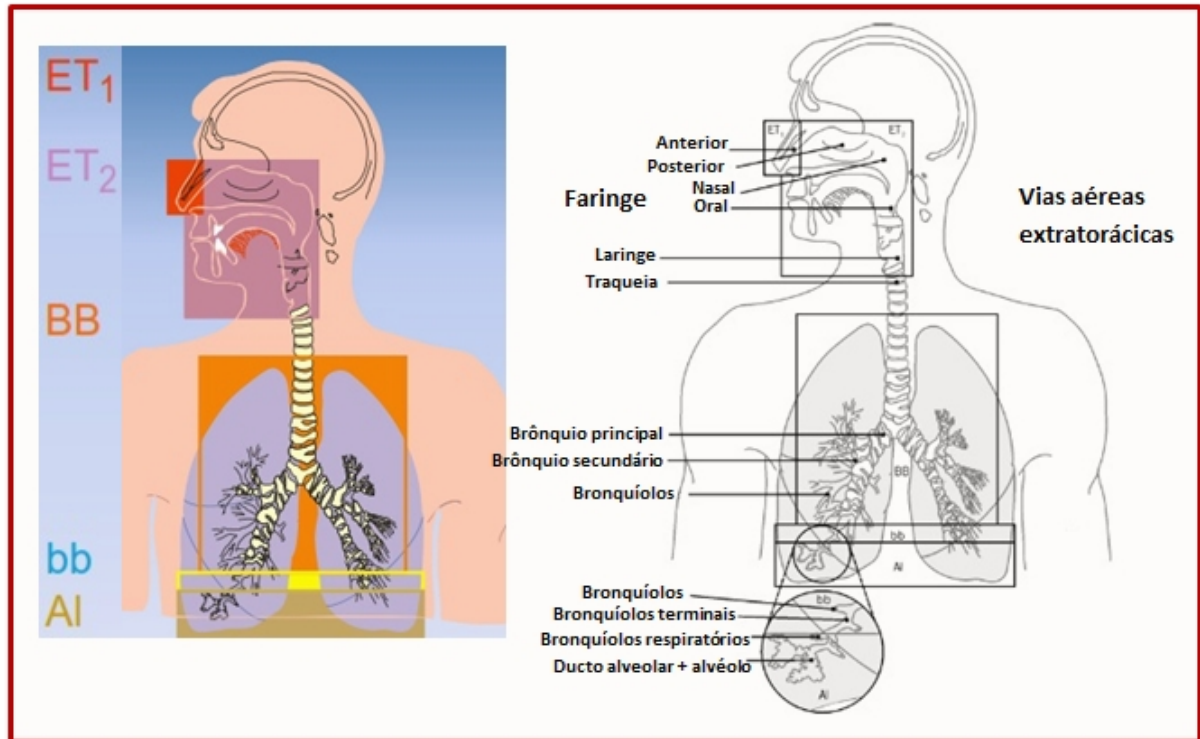
Alguns modelos dosimétricos e biocinéticos podem ser utilizados para a compreensão da interação da radiação com os tecidos e como ferramentas auxiliares para cálculos de dose. Dentre os modelos conhecidos destaca-se o *Human Respiratory Tract Model* (HRTM) elaborado pela ICRP.

O HRTM permite o estudo de materiais transportados pelo ar, como radionuclídeos ligados a partículas de aerossol, e possibilita a análise da deposição desses elementos em regiões intra e extratorácicas, além de auxiliar no estudo do fenômeno de *clearance* (BAIR, 1995), ou seja, da remoção e transporte desses elementos do trato respiratório e absorção dos mesmos pela corrente sanguínea (ICRP, 2012).

Basicamente, o modelo dosimétrico do trato respiratório da ICRP se aplica a três principais propósitos: proporcionar uma compreensão qualitativa e quantitativa do trato respiratório quando este serve de rota de entrada de radionuclídeos no corpo; possibilitar um método científico válido para cálculo de dose no trato respiratório a partir de informações de exposição; obter informações da passagem de radionuclídeos presentes no trato respiratório

para outros tecidos do organismo possibilitando, assim, cálculos de dose de corpo inteiro (BAIR, 1995).

O HRTM é dividido em cinco regiões principais baseadas nas diferenças da radiosensibilidade dos tecidos do trato respiratório e nos comportamentos de deposição dos elementos e de *clearance*. As divisões do HRTM podem ser observadas na Figura 6.



**Figura 6- Modelo dosimétrico do trato respiratório humano.**

**Fonte: Adaptado de HARRISON (2014) e BAILEY *et al.* (2012)**

Na Figura 6, a região de vias aéreas denominada de extratorácica (ET) é composta pelas estruturas da cabeça e do pescoço que, por sua vez, são subdivididas em nasal anterior (ET<sub>1</sub>), que se localiza a frente do nariz, e região ET<sub>2</sub> que abrange as cavidades nasal e oral posterior contemplando, assim, as estruturas anatômicas da faringe e laringe. Na região torácica, denominada de BB, estão inclusas as estruturas dos pulmões, traqueia e brônquios. Já, as estruturas dos bronquíolos fazem parte da região bb, e os alvéolos correspondem a região chamada de AI (intersticial alveolar) (BAILEY *et al.*, 2012).

Ainda, para cada região do HRTM são identificadas as células alvos com o objetivo de avaliar a radiosensibilidade de cada tipo celular nos cálculos de dose. Na região ET, por exemplo, são tidas como alvo as células basais do epitélio. Já nos brônquios as células basais e secretoras do epitélio são as consideradas mais sensíveis à radiação (BAILEY *et al.*, 2012).



Além do cálculo da dose absorvida, é comum na dosimetria a avaliação da dose equivalente ( $H_{T,R}$ ) depositada em um tecido ou órgão (T) pela radiação (R). No cálculo são consideradas a média de dose absorvida ( $D_{T,R}$ ) em um tecido (T) e um fator de peso ou ponderação ( $W_R$ ) que varia de acordo com o tipo e energia da radiação ionizante. Assim, a dose equivalente de cada tecido pode ser obtida por meio da Equação 2.1 (ICRP, 2012).

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R} \quad \text{Eq. 2.1}$$

O fator de peso ( $W_R$ ) é adimensional e a unidade comumente associada à dose equivalente é o sievert (Sv). A dose equivalente total ( $H_T$ ) é dada pela soma das doses equivalentes individuais dos tecidos ( $H_{T,R}$ ), conforme Equação 2.2 (ICRP, 2012).

$$H_T = \sum_R H_{T,R} \quad \text{Eq.2.2}$$

Na Tabela 4 são mostrados os valores de fator de peso ( $W_R$ ) atribuídos para os tipos de radiações diferentes. Dentre os valores do  $W_R$  apresentados na tabela destaca-se o fator de peso associado às partículas  $\alpha$ .

Tabela 4 - Fatores de peso ( $W_R$ ) atribuídos a radiações e energias diferentes

<b>Fator de peso (<math>W_R</math>)</b>	
<b>Tipo e faixa de energia</b>	<b>(<math>W_R</math>)</b>
Fótons (todas as energias)	1
Elétrons e múons (todas as energias)	1
Nêutrons, energia < 10 keV (quilo elétron-volt)	5
10 keV – 100 keV	10
> 100 keV – 2 MeV	20
> 2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
<b>Partículas <math>\alpha</math>, fragmentos de fissão, núcleos pesados</b>	<b>20</b>

Fonte: Adaptado de ICRP (2012).

Na Austrália, a média anual de dose recebida da radiação natural por um indivíduo adulto é de, aproximadamente, 1,5 a 2 mSv, sendo que cerca de 0,6 a 1,1 mSv é decorrente da inalação do gás  $^{222}\text{Rn}$  e de seus produtos de decaimento. Contudo, há registros de que em alguns

lugares do mundo a dose anual recebida pela população da radiação natural excede 100 mSv sendo conhecido um caso de 200 mSv (ARPANSA, 2005).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que cada país estabeleça um limite de referência para as concentrações de radônio *indoor* que seja tão baixo quanto razoavelmente possível considerando que as concentrações de radônio em ambientes dependem de fatores como o tipo de habitação, do *design* de construção da mesma, da geologia local, da permeabilidade do solo, entre outros. Assim, considerando dados científicos recentes sobre os efeitos na saúde decorrentes da exposição ao radônio, a OMS recomenda como valor limite de referência 100 Bq/m<sup>3</sup> (WHO, 2009).

Nos casos em que não for possível adotar o valor de referência da OMS, o ideal é que as concentrações de radônio não ultrapassem 300 Bq/m<sup>3</sup>, que equivale a 20 mSv por ano, conforme estabelecido pela ICRP (2014). Acima desse nível de concentração é recomendável que uma investigação minuciosa da situação seja feita e que medidas de mitigação sejam implementadas afim de reduzir a exposição humana ao gás radônio.

## 2.3 Rochas graníticas

### 2.3.1 Variedade de granitos

Os granitos são rochas ígneas originadas da consolidação do magma presente em grandes profundidades além da superfície terrestre que ultrapassam, em alguns casos, 10 quilômetros. O magma, rocha fundida localizada no interior da crosta terrestre, sofre a ação de grandes pressões e temperaturas devido a profundidade em que se encontra e, por isso, o seu processo de solidificação é lento permitindo, assim, que vários minerais se agreguem e façam parte da composição das rochas graníticas formadas (MINEROPAR, 2015).

As rochas graníticas podem ser caracterizadas como rochas silicatas (compostas por silício e oxigênio), cuja composição mineralógica principal engloba os minerais feldspatos, feldspatóides e quartzo. Geralmente, associações bem variadas de minerais como quartzo, feldspato, micas (biotita e muscovita), anfibólios (sobretudo hornblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina são observadas (MINEROPAR, 2015; MENEZES e LARIZZATTI, 2005).

A cor dos granitos é dependente da variabilidade e da quantidade de minerais que compõem a rocha. Minerais escuros, como os anfibólios e biotitas, frequentemente estão

presentes na maioria delas. Uma grande variedade de minerais menores, tais como o zircão, a titanita e a apatita, também pode ser encontrada (FILHO e RODRIGUES, 2009; MINEROPAR, 2015). A Figura 7 apresenta parte da variabilidade de cores de rochas graníticas brasileiras.

Segundo Menezes e Larizzatti (2005), as rochas comercializadas como granitos incluem tanto as rochas ígneas quanto as metamórficas. As rochas metamórficas são originadas do processo de transformação da composição mineral, textura e estrutura microscópica de rochas preexistentes na crosta terrestre, que sofrem tais transformações quando são submetidas a altas temperaturas e pressões (MINEROPAR, 2015).



**Figura 7 - Variedade de cores de granitos brasileiros.**

**Fonte: MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO (2007)**

As rochas metamórficas apresentam um aspecto cristalino semelhante ao do granito, mas diferem deste por apresentarem bandamento e orientação diferente dos seus minerais (MINEROPAR, 2015). O bandamento corresponde à estrutura tabular das rochas que é formada pela alternância de composição, coloração ou granulometria do material rochoso (CPRM, 2015). O gnaiss e o migmatito são exemplos de rochas de origem metamórfica.

As rochas gnaisses apresentam granulação que varia de fina a grossa e caracterizam-se pelo predomínio em sua estrutura de bandas quartzo-feldspáticas sobre as de minerais micáceos, principalmente a biotita e/ou hornblenda. Já as os migmatitos são rochas híbridas de estrutura heterogênea responsável por padrões visuais interessantes e apreciados no mercado (MENEZES e LARIZZATTI, 2005).

Na Figura 8 é possível observar a posição do granito na crosta terrestre durante a sua

formação além de algumas diferenças visuais decorrentes da composição das rochas ígneas e metamórficas.

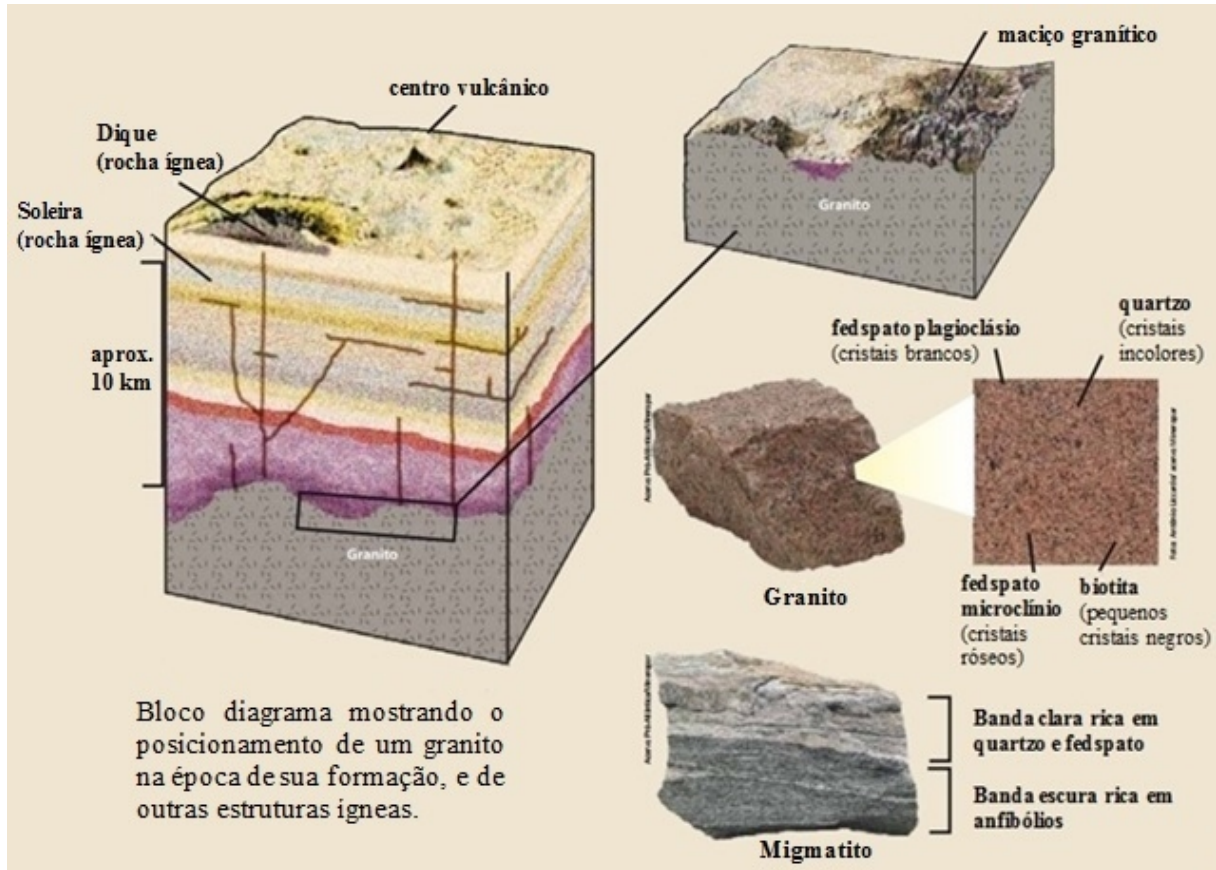


Figura 8 - Formação das rochas graníticas e composição das rochas ígneas e metamórficas.

Fonte: MINEROPAR (2015)

### 2.3.2 Produtos da indústria de rochas

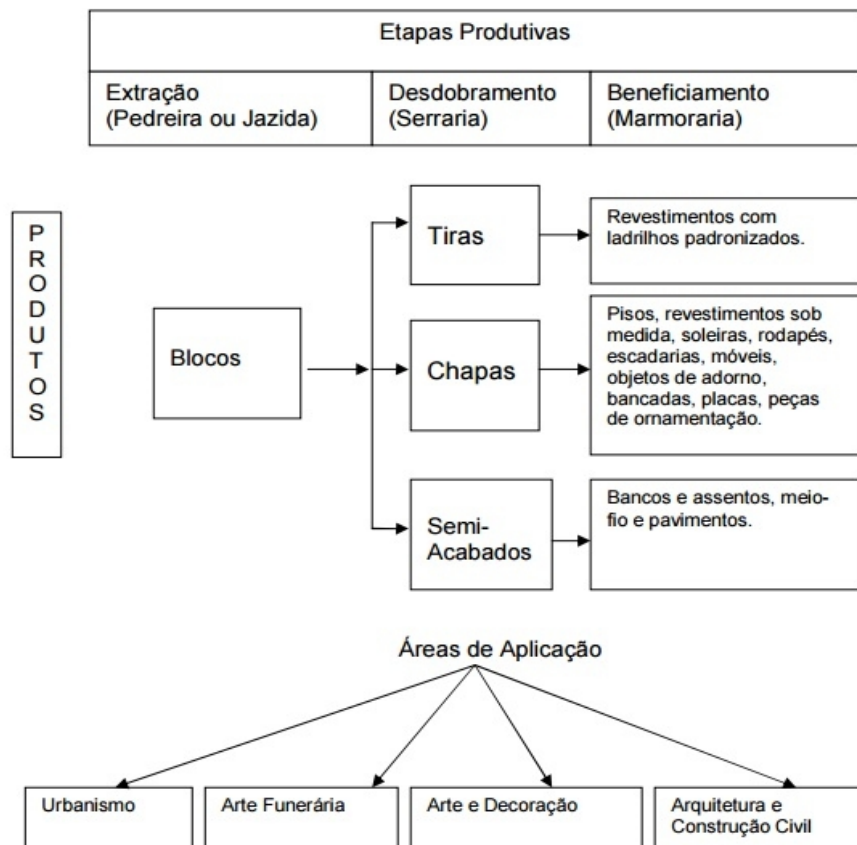
Segundo Menezes e Larizzatti (2005) a comercialização de rochas metamórficas contribui para que haja um número maior de produtos no mercado com uma vasta quantidade de texturas e composições minerais diferentes, o que garante a oferta de rochas com cores e padrões estéticos distintos.

Várias rochas ígneas são utilizadas como rochas ornamentais ou de revestimento. Rocha ornamental é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como todo material rochoso natural que é utilizado para fins estéticos por meio do seu modelamento ou beneficiamento, de forma que as rochas possam ser empregadas na concepção de esculturas, balcões, lápides, tampos e pés de mesa, entre outros (MENEZES e LARIZZATTI, 2005; MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2007). Assim, as rochas ornamentais são comercializadas

com o objetivo de exercerem funções essencialmente decorativas.

Já, rochas de revestimento podem ser definidas como materiais rochosos que são transformados em chapas que, normalmente, são polidas e cortadas em placas para serem utilizados no revestimento interno e externo de pisos, paredes e tampos especialmente os empregados em pias de cozinha (ABNT 2005 *apud* MENEZES e LARIZZATTI, 2005; ASTM, 2003).

Na Figura 9 algumas áreas de aplicação, assim como diferentes processos de desdobramento (cortes) e beneficiamento das rochas utilizadas pela indústria são apresentados em forma de fluxograma.

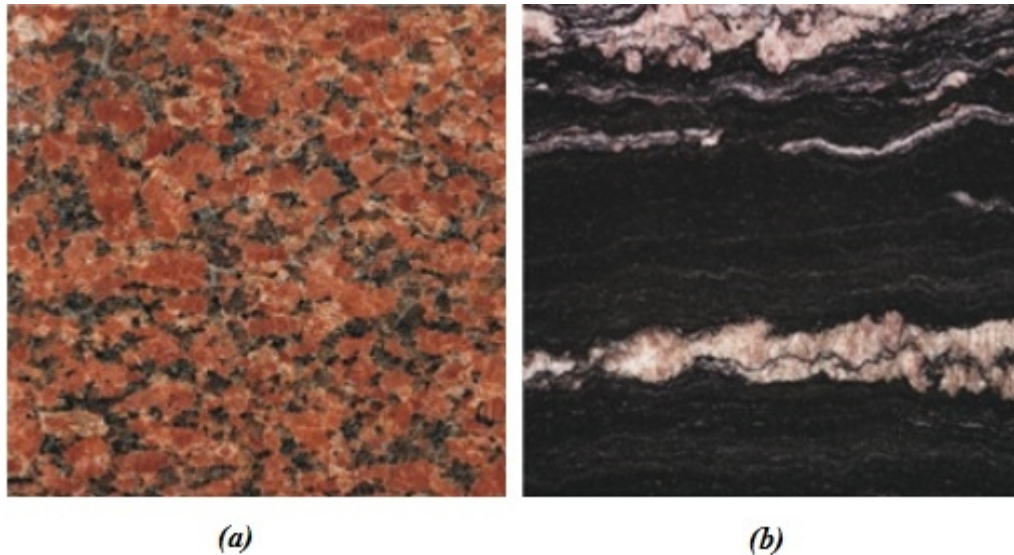


**Figura 9 - Produtos da indústria de rochas.**

Fonte: FILHO E PINTO (2000) e SPÍNOLA (2003) *apud* SPÍNOLA *et al.*, (2004)

Comercialmente, as rochas mais empregadas em obras de revestimento são as ditas isotrópicas (sem orientação preferencial dos constituintes mineralógicos) por serem consideradas homogêneas. As rochas que apresentam desenhos devido a sua orientação mineralógica

(anisótropas) são normalmente utilizadas na fabricação de peças isoladas. Do ponto de vista comercial as rochas anisótropas são conhecidas como “rochas movimentadas” (FILHO e RODRIGUES, 2009). Exemplos das características visuais de rochas graníticas isotrópicas e anisótropas podem ser observados na Figura 10.



**Figura 10 - Rocha isotrópica - granito Vermelho Brasília (A). Rocha anisótropa - granito Porto Rosa (B).**

**Fonte: Adaptado de FILHO e RODRIGUES (2009)**

Atualmente, os estudos acerca da avaliação dos riscos em marmorarias se destinam, basicamente, a realização de medidas de parâmetros como temperatura, luminância, ergonomia do local de trabalho, nível de ruído e qualidade do ar (SANTOS *et al.*, 2007; TAVARES *et al.*, 2000; FUNDACENTRO, 2008). Todavia, considerando a radioatividade inerente das rochas graníticas se faz necessária a avaliação e o controle da exposição humana à radioatividade natural das rochas tanto em ambientes de marmorarias como em construções habitacionais.

Cada vez mais as rochas graníticas são empregadas na construção de monumentos e para fins ornamentais e decorativos, sendo crescente também o uso de granitos no interior de habitações e edifícios modernos.

Geralmente, nas construções são utilizados ladrilhos e placas de granito de 3 cm de espessura para o revestimento de pisos e paredes. Todavia, em alguns casos o revestimento de pisos e assoalhos pode ser feito com placas de granito de 20 cm de espessura (ANJOS *et al.*, 2011).

### 2.3.3 Mecanismo de transporte do gás radônio proveniente de rochas graníticas para o ambiente

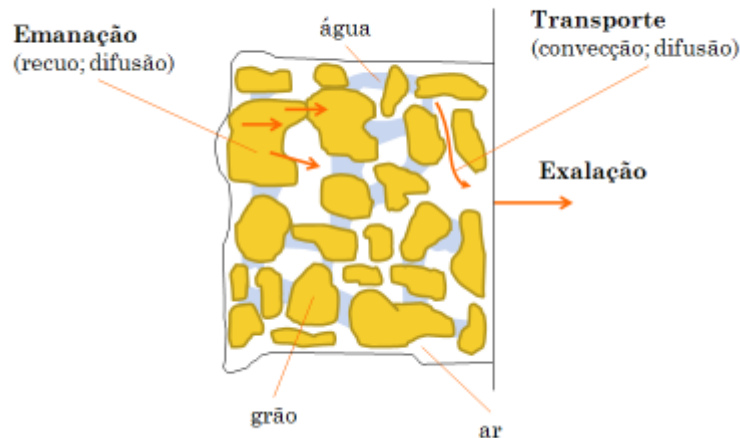
O uso generalizado de rochas graníticas tem gerado considerável preocupação pública quanto a exposição humana à radiação natural que é proveniente desses materiais, já que inúmeras pesquisas comprovam que os radionuclídeos de ocorrência natural estão presentes em quantidades significativas em rochas ígneas como o granito (ANJOS *et al.*, 2011; VEIGA *et al.*, 2006; ANJOS *et al.*, 2006; HASSAN *et al.*, 2010; ANJOS *et al.*, 2010).

Recentes considerações feitas pela IARC e pela Organização Mundial de Saúde ressaltam que a principal ameaça à saúde associada ao gás radônio é decorrente da inalação e deposição interna desse radionuclídeo, já que as partículas  $\alpha$  apresentam baixa capacidade de penetrar na pele (menor do que 0,1 mm). No mesmo documento destaca-se, também, a evidência de que o radônio presente no ar ambiente é liberado do solo e de materiais de construção. A exposição ocupacional é atribuída ao urânio e a atividade de mineração subterrânea do mineral presente em rochas ígneas, metamórfica e sedimentares conhecido como hematita (IARC, 2014).

Por sua vez, Hassan *et al.*, (2010) destaca que a radiação gama ( $\gamma$ ) dos materiais de construção é responsável pela exposição externa direta dos indivíduos, e a exposição interna se dá pelas partículas  $\alpha$  provenientes dos gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  e dos produtos de decaimento desses radionuclídeos que se depositam no trato respiratório.

O gás  $^{222}\text{Rn}$  é liberado do interior de materiais para o ambiente através de emanação, difusão, convecção e exalação. Os processos de emanação e exalação são os principais responsáveis pela saída do radônio dos materiais para a superfície (SOUZA, 2009; FIOR, 2008).

Na emanação o radônio é liberado das partículas sólidas do material para os poros do mesmo, que podem estar preenchidos por ar ou água (SOUZA, 2009; FIOR, 2008). Subsequente a emanação, pode ocorrer o processo de exalação que é caracterizado pelo transporte efetivo dos átomos do gás presente nos poros dos materiais para o ambiente (SOUZA, 2009). O fluxo de radônio que sai da superfície do material é denominado de taxa de exalação, a qual pode ser medida em  $\text{Bq/m}^2\cdot\text{s}$  (UNSCEAR, 2000). Os mecanismos de transporte e liberação de  $^{222}\text{Rn}$  presentes em materiais são ilustrados na Figura 11.



**Figura 11- Principais mecanismos de transporte e liberação do  $^{222}\text{Rn}$  de materiais para o ambiente.**

**Fonte: COSTA (2011)**

As concentrações de radionuclídeos, como o rádio e o radônio, em rochas são determinadas pela geologia do local. Rochas graníticas estão entre os tipos de rochas que normalmente apresentam alto potencial para a emanção de radônio (ASTM, 1994).

O potencial de radônio de uma província geológica pode ser determinado pela análise da riqueza geológica existente na região, por dados radiométricos aéreos, pelo radônio no solo e através de dados acerca das concentrações *indoor* do gás (ASTM, 1994). A radiometria é uma técnica que mede a distribuição de material radioativo, como potássio, urânio e tório, presente no solo e rochas por meio de detectores de raios  $\gamma$  que são posicionados a uma determinada altura do solo (BONOTTO *et al.*, 2009; ASTM, 1994).

Já é conhecido o fato de que condições meteorológicas podem alterar a quantidade de radônio que emana de um material. Experimentos mostram que no caso dos granitos a emanção de radônio aumenta, aproximadamente, 10% quando as rochas são aquecidas de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $22^{\circ}\text{C}$  (ASTM, 1994).

Propriedades físicas dos granitos como a porosidade e a permeabilidade são alteradas mediante o aquecimento desses materiais. A porosidade total da rocha corresponde a fração de volume de todo o espaço vazio existente no interior do material poroso que, neste caso, é a rocha. Por sua vez, a permeabilidade representa a capacidade de um material em transmitir fluidos (TAKARLI e PRINCE-AGBODJAN, 2008).

No caso das rochas a permeabilidade depende de fatores como a mobilidade do fluido, da porosidade da rocha, entre outros. Assim, a permeabilidade é um dos mais importantes parâmetros utilizados para a caracterização de um material poroso (TAKARLI e PRINCE-



AGBODJAN, 2008).

A porosidade de um material rochoso pode ser ligeiramente aumentada quando o mesmo é submetido a temperaturas que variam de 105°C e 500°C. Alterações significativas da porosidade podem ser observadas entre temperaturas de 500°C a 600°C. Tal fato pode ser explicado pela abertura de microfissuras pré-existentes que aumentam sua extensão mediante o aumento de temperatura (TAKARLI e PRINCE-AGBODJAN, 2008).

Já no caso da permeabilidade a taxa de fluxo de gás aumenta ligeiramente para temperaturas entre 105°C e 300°C, significativamente no caso de temperaturas entre 300°C a 500°C, e drasticamente para temperaturas superiores a 500°C (TAKARLI e PRINCE-AGBODJAN, 2008).

Essas relações existentes entre a temperatura, porosidade e permeabilidade são importantes para o entendimento das variações das taxas de exalação de radônio que sai dos materiais rochosos como o granito. Ainda, é crucial que tais relações sejam consideradas no momento da análise de medidas de concentrações de radônio *indoor*.

Estudos realizados nas Cordilheiras Apalaches da América do Norte mostram que as altas concentrações de radônio das águas subterrâneas do local, provavelmente estão associadas às concentrações de urânio e rádio existentes nas rochas graníticas da região. Os granitos ditos uraníferos, ou seja, que contêm urânio, localizados nos estados americanos de Maine e da Geórgia são considerados os responsáveis pelo grave problema de concentrações *indoor* de radônio existente na região (ASTM, 1994).

### 2.3.4 Índices de concentração de rádio equivalente

O risco associado à exposição à radiação dos materiais que contém  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em sua composição pode ser avaliado através de índices como a atividade de rádio equivalente ( $Ra_{eq}$ ) e o índice de concentração de atividade ( $I$ ).

O rádio equivalente ( $Ra_{eq}$ ), expresso em Bq/kg, infere o nível de radioatividade de um material considerando as concentrações de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  por meio da relação matemática da Equação 2.3, na qual os termos  $A_{226}$ ,  $A_{232}$  e  $A_{40}$  correspondem às concentrações de atividade de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , respectivamente (BERETKA e MATHEW, 1985 *apud* AL-SULAITI et al., 2008)

$$Ra_{eq} = A_{226} + (1,43 \cdot A_{232}) + (0,077 \cdot A_{40}) \quad \text{Eq. 2.3}$$

Alguns estudos sugerem 370 Bq/kg como valor limite de aceitação de  $R_{aeq}$  de um material (BERETKA e MATHEW, 1985 *apud* AL-SULAITI et al., 2008).

O índice de concentração de atividade ( $I$ ) deve ser calculado de acordo com a Equação 2.4, conforme orientações da *European Commission* (EUROPEAN COMMISSION, 1999).

$$I = (A_{226}/300) + (A_{232}/200) + (A_{40}/3000) \quad \text{Eq. 2.4}$$

Na Equação 2.4,  $A_{226}$ ,  $A_{232}$  e  $A_{40}$  correspondem as concentrações de atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em Bq/kg, e  $I$  é adimensional. Para valores de  $I \leq 0,5$  é atribuída uma dose efetiva anual menor ou igual a 0,3 mSv/a, e valores de  $I > 1$  são associados a uma dose efetiva anual menor ou igual a 1 mSv/a.

### 2.3.5 Normas e posições regulatórias

De acordo com a UNSCEAR (2008), em alguns materiais utilizados na construção civil os valores médios de concentração dos radionuclídeos naturais ultrapassam as concentrações dos mesmos radionuclídeos encontrados no solo. Algumas rochas graníticas podem apresentar valores médios de atividade específica de  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$  equivalentes a 84 Bq/kg, 77 Bq/kg e 1.200 Bq/kg, respectivamente.

Segundo a IAEA, materiais como granito e fosfogesso apresentam uma exalação de  $^{222}\text{Rn}$  significativa para ambientes fechados, e embora seja possível medir a exalação do  $^{222}\text{Rn}$  desses materiais de construção, nem sempre é fácil a correlação das medidas de exalação com as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  reais presentes no ambiente fechado após a construção do mesmo. Ainda, a IAEA sugere procedimentos para o controle e redução da exposição ao radônio e a radiação provenientes de materiais de construção (IAEA, 2015).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), autarquia federal vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), é o órgão responsável por estabelecer normas e regulamentos acerca da radioproteção.

Apesar de ainda não existir uma norma que estabeleça limites de referência de exposição ao radônio proveniente especificamente de rochas graníticas, a CNEN por meio de sua Resolução 189/2015, apresenta níveis de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil, definindo proporções aceitáveis de diluição de fosfogesso no gesso comum a ser realizada dentro de instalações mínero-industriais, considerando os valores de concentrações de atividade

de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ . Tais valores de concentrações devem ser medidos por laboratórios reconhecidos pela CNEN (CNEN, 2015).

A CNEN, em sua Posição Regulatória 3.01/007, estabelece o valor de referência de 10 mSv/a para que sejam aplicadas ações de intervenção em situações de exposição crônica (persistente ao longo do tempo) de membros do público. Na mesma normativa do órgão a exposição crônica de indivíduos do público é descrita como aquela que é originada de elevado teor de radionuclídeos presentes no solo e da radiação oriunda de materiais de construção que apresentam alto teor de elementos das séries radioativas do urânio e do tório (CNEN-NN 3.01, 2014).

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM), responsável por desenvolver e publicar normas técnicas sobre materiais, produtos, serviços e sistemas, alerta para a necessidade de se conhecer e identificar materiais potencialmente radioativos citando o fato de que os blocos de granito, localizados na rua do lado de fora do famoso Edifício Thomas Jefferson construído na biblioteca do Congresso dos Estados Unidos, possuem em sua composição elementos radioativos que produzem uma dose de cerca de 0,3  $\mu\text{Sv/h}$  (ASTM, 2016a; ASTM, 2016b).

### 2.3.6 Concentrações de $^{222}\text{Rn}$ em residências

Os granitos pré-cambrianos do sudeste do estado de Missouri estão entre as rochas ígneas mais altamente uraníferas dos Estados Unidos. Analogamente, os granitos das montanhas da Serra Nevada são ricos em urânio e, por isso, contribuem significativamente com as concentrações de radônio em ambientes internos equivalentes a 74 Bq/m<sup>3</sup> no estado da Califórnia (ASTM, 1994).

De acordo com Hess *et al. apud* (1980) IARC (2012), na Suécia a presença de granito em uma determinada área já é um indicador de uma potencial região que apresenta altos níveis de radônio. Essa relação pode ser atribuída a constatação de que elevadas concentrações de radônio em ambientes internos foi correlacionada à presença de granitos escandinavos na região.

Uma pesquisa realizada na Noruega avaliou as concentrações de radônio em 1500 casas de 75 municípios diferentes. Os resultados mostraram que os valores de concentrações *indoor* de radônio mais elevados eram decorrentes de áreas que continham xisto e granito. Nos locais constituídos de rochas graníticas as concentrações de radônio variaram de 30 a 800 Bq/m<sup>3</sup>,

enquanto que os valores encontrados para o solo sem rochas graníticas variaram de 20 a 200 Bq/m<sup>3</sup> (IARC, 2012).

Azevedo (2013) apresenta em seu trabalho as concentrações de radônio obtidas de amostras de rochas graníticas comumente utilizadas no Ceará. Para o estudo, as medidas foram realizadas em circuito fechado em ciclos pré-definidos de 5, 10, 15, 20 e 25 dias. Os resultados desse estudo estão reunidos na Figura 12.

Rochas	Ciclo 5 dias (Bq/m <sup>3</sup> )	Ciclo 10 dias (Bq/m <sup>3</sup> )	Ciclo 15 dias (Bq/m <sup>3</sup> )	Ciclo 20 dias (Bq/m <sup>3</sup> )	Ciclo 25 dias (Bq/m <sup>3</sup> )
Green Galaxy – GG	9,33	19,00	48,00	17,00	60,00
Juparaná Gold – JG	213,00	273,00	314,00	305,33	321,67
Verde Ceará – VC	35,33	59,67	62,67	71,33	52,67
Verde Light – VL	72,00	82,67	77,33	140,00	94,00
Vermelho Filomena – VF	78,00	153,67	136,33	178,33	199,00
Red Dragon – RD	37,33	42,67	45,33	74,33	54,33
Yellow Tropical – YT	195,67	251,67	181,33	178,33	153,33
Branco Cristal Quartzo – BCQ	329,33	592,00	462,00	481,33	715,33
Rosa Iracema – RI	91,00	133,00	287,33	256,00	244,33
Cinza Prata – CP	54,33	54,00	74,67	124,00	72,33
Branco Ceará – BC	56,33	66,33	85,00	83,00	129,33
Branco São Paulo – BSP	102,33	139,67	159,33	102,67	199,33
Infinity Gold – IG	7,33	14,33	10,33	19,67	11,33
Cinza Ouro Branco – COB	51,00	41,33	40,33	54,00	39,67
Bourdeaux Terracota – BT	54,67	63,33	54,67	93,00	81,33

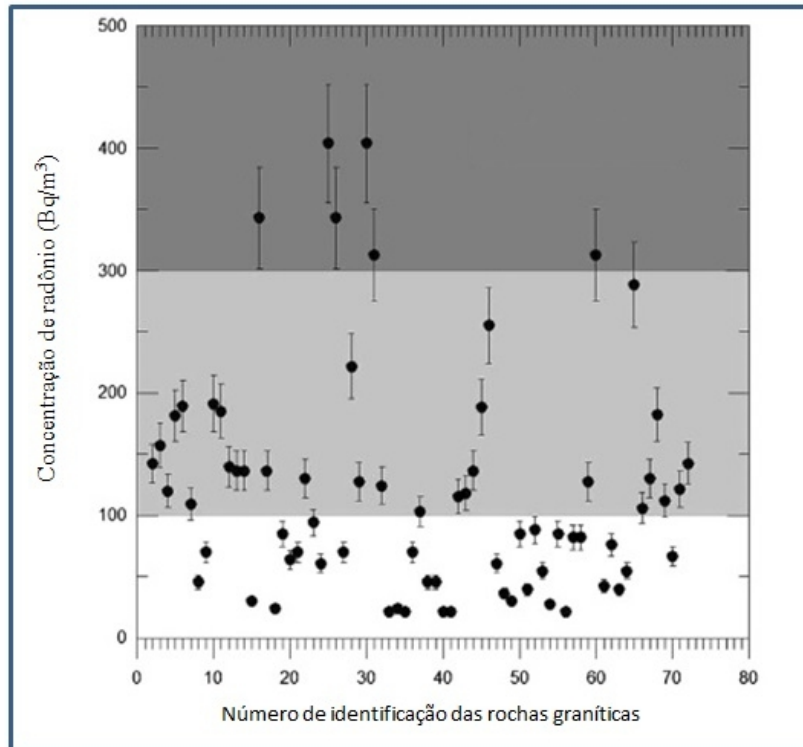
Figura 12 - Concentrações de radônio provenientes de rochas graníticas do estado do Ceará.

Fonte: AZEVEDO (2013)

No trabalho de Anjos *et al.*, (2011) foram avaliadas as concentrações de atividade de <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra e <sup>40</sup>K, aproximadamente, 300 amostras de 100 tipos diferentes de granitos comumente comercializados no Brasil. As amostras estudadas foram coletadas de 10 estados brasileiros: Espírito Santo, Minas Gerais, Bahia, Rondônia, Ceará, Pernambuco, Goiás, Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. A avaliação das amostras pelo método de espectrometria gama mostrou que os valores de atividade encontrados para os radionuclídeos <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra e <sup>40</sup>K variaram de 4,5 a 450 Bq/kg, 4,9 a 160 Bq/kg e de 120 a 2029 Bq/kg, respectivamente.

Ainda, a pesquisa descreve a construção de 5 ambientes, com dimensões de (5,0m x 4,0m x 2,8m), que foram recobertos com diferentes tipos de granitos comerciais brasileiros. Nas paredes da construção foram afixadas placas de granito de 3 cm de espessura, e na laje e pisos granito de 20 cm de espessura. No ambiente projetado foram detectadas concentrações de radônio de 21 a 404 Bq/m<sup>3</sup> (ANJOS *et al.*, 2011).

De acordo com os resultados da pesquisa de Anjos *et al.* (2011), o granito comercialmente denominado de cinza, que apresenta como componentes mineralógicos a biotita monzogranito e granodiorito, está entre os que contribuíram com as concentrações mais elevadas do gás radônio. As concentrações de radônio encontradas para diferentes tipos de rochas podem ser observadas na Figura 13.



**Figura 13 - Concentrações de radônio obtidas em ambientes internos (5,0m x 4,0m x 2,8m) revestidos com rochas graníticas brasileiras.**

**Fonte: Adaptado de ANJOS *et al.*, (2011)**

Todas as concentrações de radônio apresentadas na Figura 13 foram medidas em ambientes projetados com pouca ventilação.

Já um estudo realizado também com o emprego da espectrometria gama analisou 81 amostras de 20 tipos diferentes de rochas graníticas usualmente comercializadas na China. Medidas das atividades de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  foram realizadas e os resultados encontrados mostram que a atividade encontrada de  $^{226}\text{Ra}$  nas amostras analisadas variam de 14,5 a 204,7 Bq/kg. Já para o  $^{232}\text{Th}$  foram obtidos valores entre 16,7 e 186,7 Bq/kg e para o  $^{40}\text{K}$  foram encontrados resultados de 185,7 a 1745,6 Bq/kg (XINWEI *et al.*, 2006).

No Japão, as concentrações de radionuclídeos foram analisadas em 15 amostras de granitos. Os valores médios de atividade de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  encontrados foram de 34 - 253

Bq/kg, 50 – 373 Bq/kg e 1005 – 798 Bq/kg, respectivamente. As taxas de exalação de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  também foram avaliadas na pesquisa. Os resultados do estudo realizado no Japão mostram valores médios de exalação para o radônio de  $0,35 \pm 0,32 \text{ mBq}/(\text{m}^2\text{s})$  e para o torônio de  $940 \pm 834 \text{ mBq}/(\text{m}^2\text{s})$ . As diferenças entre as taxas de exalação encontradas para o  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  foram atribuídas às variações das concentrações de rádio e tório das rochas graníticas avaliadas, a porosidade, ao polimento da superfície dos granitos e a cristalografia dos materiais (HASSAN *et al.*, 2011).

Com base nos resultados encontrados, os autores recomendam que alguns tipos de granito sejam utilizados com cautela, principalmente devido aos resultados de índice de rádio equivalente encontrados em alguns casos. Para o uso considerado seguro dos materiais, o valor de  $Ra_{\text{eq}}$  deve ser menor do que 370 Bq/kg para que a dose externa de radiação, decorrente dos raios  $\gamma$ , seja inferior a 1,5 mSv por ano (HASSAN *et al.*, 2011).

Alguns valores limites de recomendação para o  $Ra_{\text{eq}}$  decorrente de materiais de construção são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites de recomendação para o rádio equivalente de materiais de construção

Rádio equivalente (Bq/kg)	Classificação	Recomendação
< 370	1	Aceitável para construções/residências
370 - 740	2	Aceitável para a indústria
740 - 2220	3	Aceitável para estradas e pontes
2220 - 3700	4	Aceitável para o uso em fundação de edifícios não residenciais
>3700	5	Não deve ser usado para construções de qualquer tipo

Fonte: Adaptado de FARAI e ADEMOLA (2005) *apud* HASSAN *et al.*, (2010)

### 2.3.7 Mercado interno e externo de rochas graníticas

O mercado de importação e exportação de rochas movimenta todos os anos bilhões de dólares, e o Brasil é um dos países que está entre o *ranking* dos maiores produtores de rochas ornamentais. As transações comerciais movimentadas pelo setor de rochas são estimadas entre US\$ 80 – 100 bilhões/ano, proporções essas de faturamento que incluem o Brasil como um efetivo “global player” no grupo dos grandes países produtores e exportadores mundiais

(FILHO e CHIODI, 2009; BRAZIL S/A, 2013)

Segundo os dados da cartilha publicada pelo Ministério da Saúde em conjunto com a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica do país, o Brasil está entre os cinco maiores países produtores de rochas ornamentais. No ano de 2006, o Espírito Santo foi considerado como o maior estado exportador brasileiro por ser responsável por 65% das exportações do país (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2007).

A importância do Brasil no mercado internacional de rochas ornamentais é notória. Dos anos de 1920 a 2011, a produção global de matéria-prima no país evoluiu de 1.800.000 toneladas por ano para 115 milhões (BRAZIL S/A, 2013).

Dentre os principais estados exportadores brasileiros, em ordem decrescente de faturamento, estão o Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Ceará e Bahia. Somente o estado do Espírito Santo representa 40% da produção nacional de rochas ornamentais (BRAZIL S/A, 2013).

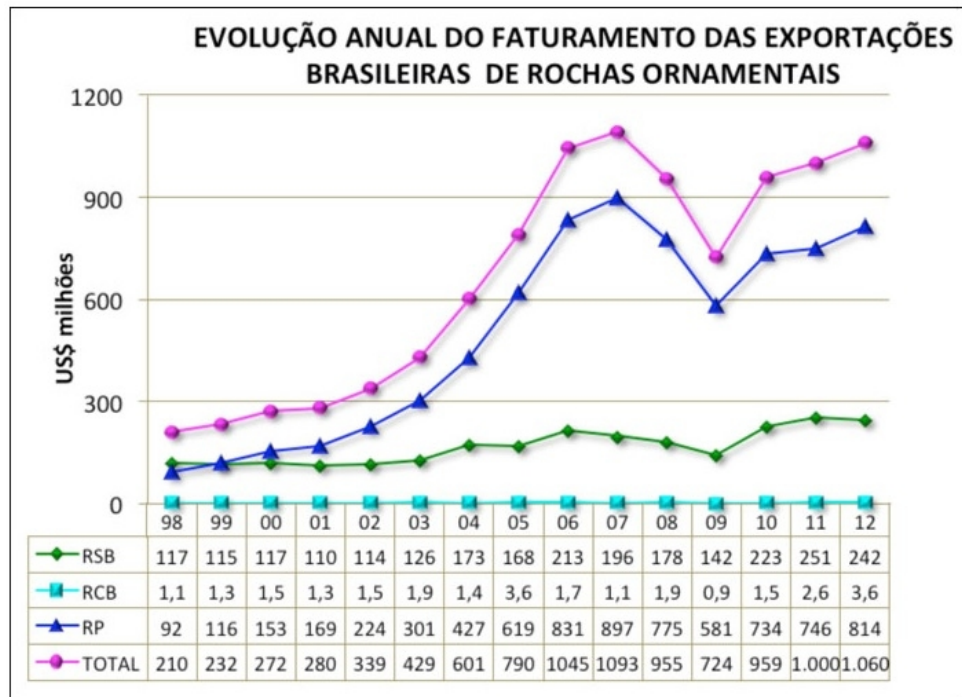
As exportações de rochas ornamentais brasileiras se destinam a cinco principais países: Estados Unidos, China, Itália, Espanha e Reino Unido dispostos em ordem decrescente de faturamento. As chapas polidas de granito, empregadas no uso de bancadas de cozinha, representam um percentual significativo de parte das exportações realizadas para os Estados Unidos. Já, dentre os principais mercados da região da América do Sul estão a Argentina, Chile e Venezuela (BRAZIL S/A, 2013).

A Figura 14 mostra a evolução anual do faturamento das exportações do Brasil de rochas ornamentais entre os anos de 1998 e 2012.

O início da queda das exportações brasileiras no início do ano de 2007 mostrado na Figura 14 é atribuído a instalação da crise imobiliária nos Estados Unidos e a repercussão da mesma na economia mundial (FILHO e CHIODI, 2009).

No ano de 2015, a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS) publicou dados atualizados acerca do mercado das exportações e importações brasileiras de rochas (ABIROCHAS, 2015).

As estatísticas apontam que o Brasil exportou, entre os meses de janeiro e setembro de 2015, o equivalente a US\$ 127 milhões de granitos cortados em blocos ou chapas, e cerca de US\$ 12 milhões de granitos no estado bruto ou desbastado (com polimento e lustro) (ABIROCHAS, 2015; SEFAZ, 2015; MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2007). Para o mesmo período, os valores associados às importações brasileiras são de, aproximadamente, US\$ 62 milhões e US\$ 16 milhões para os granitos em blocos ou chapas e para os granitos brutos ou desbastados, respectivamente (ABIROCHAS, 2015).



RSB: bloços de granito  
RCB: bloços de mármore  
RP: rochas processadas

**Figura 14 - Evolução do faturamento brasileiro entre os anos de 1998 e 2012 no mercado de rochas.**

Fonte: BRAZIL S/A (2013)

Os números associados à demanda do mercado internacional por rochas graníticas brasileiras expressam claramente a importância e as proporções desse setor industrial. Especialistas da área alertam que dentre os principais desafios e demandas setoriais está a necessidade de maior articulação por parte das instituições governamentais sobre as barreiras tarifárias e não tarifárias impostas ao Brasil pelo mercado internacional (FILHO e CHIOLDI, 2009).

Considerando que barreiras não tarifárias correspondem aos mecanismos ou instrumentos impostos pela política econômica que influenciam o comércio internacional sem o uso de mecanismos tarifários (ABIMAQ, 2015), destaca-se nesse panorama as regulamentações comerciais relativas à comercialização de materiais que possam apresentar níveis de radioatividade, como no caso das rochas graníticas.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, alguns veículos de comunicação do EUA noticiaram problemas relativos aos níveis de radioatividade, em particular da exalação do radônio, proveniente de rochas graníticas importadas pelo país para a construção de bancadas (ABIROCHAS, 2008; IBRAM, 2008).



Considerando que a maior parte das exportações de rochas do Brasil é destinada aos EUA, a notícia repercutiu negativamente e chamou atenção das empresas brasileiras. Por mais que as informações sejam consideradas como equivocadas segundo o Coordenador de Relações Internacionais da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral do MME, representantes de vários institutos nacionais se reuniram para criar uma comissão com o objetivo de discutir o problema e de propor soluções quanto a barreira comercial americana criada (ABIROCHAS, 2008; IBRAM, 2008).

A comissão composta por representantes de instituições como o MME (Ministério de Relações Exteriores), IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração), ABIROCHAS, INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) entre outros, propôs no ano de 2008 a elaboração de um protocolo de intenções para a realização de testes destinados a mediação das concentrações de radônio provenientes dos granitos brasileiros, além da criação de uma norma para que um índice de radiação fosse estabelecido (IBRAM, 2008). Em documento publicado no ano de 2013, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) divulgou a compra de equipamento portátil para a medição de radônio (CGB, 2013).

A ABIROCHAS também anunciou a possibilidade de parcerias com a CNEN e o IRD (Instituto de Radioproteção e Dosimetria) para a realização de ensaios em rochas brasileiras com a finalidade de medir a taxa de exalação do radônio e de realizar medidas radiométricas de urânio, tório e potássio (ABIROCHAS, 2008). Todavia, ainda não existe regulamentação específica por parte da CNEN quanto a avaliação de radônio e de demais radionuclídeos presentes em materiais de construção, e em especial em rochas graníticas.

Dependendo do país, às rochas graníticas são aplicadas políticas de regulamentações que também são utilizadas para demais materiais de construção. Contudo, conhecer a radioatividade inerente aos granitos que são exportados é fundamental para que esses materiais não sejam classificados como materiais radioativos no país de destino. Fato esse que pode ocorrer quando a emissão de radiação natural desses materiais for elevada (GB, 2010 *apud* IRD, 2015).

A Comunidade Europeia estabelece que os materiais utilizados na construção não devem contribuir com concentrações superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> no ambiente, e que o material pode ser utilizado se a sua contribuição para a dose externa da população for menor do que 0,3 mSv no ano (EC-112, 1999 *apud* IRD, 2015).

Já a China, em sua norma GB6566-200X de 2010, considera as exposições ou índices de atividade internas ( $I_{Ra}$ ) e externas ( $I_R$ ) decorrentes dos radionuclídeos dos materiais utilizados na construção. O gás radônio, filho do elemento  $^{226}\text{Ra}$ , é o responsável pela

exposição interna dos indivíduos e o índice de exposição externa é atribuído aos elementos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . Tanto o  $I_{\text{Ra}}$  quanto o  $I_{\text{R}}$  são relacionados aos tipos de construções e aos materiais utilizados nas mesmas. As construções são divididas em duas classes I e II, onde a primeira é relativa às construções como residências, escolas, hospitais, escritórios e hotéis. Por sua vez, a classe II refere-se a ambientes como shoppings, livrarias, museus, academias, restaurantes, entre outros. As construções industriais não são inclusas em nenhuma das classes mencionadas (GB, 2010 *apud* IRD, 2015).

A China ainda determina que os materiais sejam subdivididos em materiais principais (utilizados na estrutura da construção, como por exemplo o concreto) e materiais decorativos que também são subdivididos em classe A, B e C. As classificações dos materiais decorativos se dá de acordo com o índice de atividade que é estabelecido considerando os radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . A Figura 15 mostra os critérios chineses quanto a aplicação dos materiais na construção civil de acordo com os seus índices de atividade (IRD, 2015 *apud* GB, 2010).

Uso	$I_{\text{Ra}}$	$I_{\text{r}}$
Material principal	$\leq 1$	$\leq 1$
<b>Materiais decorativos</b>		
Classe A	$\leq 1$	$\leq 1,3$
Classe B usada só para classe II	$\leq 1,3$	$\leq 1,9$
Classe C usada só para superfícies externas		$\leq 2,8$

**Figura 15 - Critérios chineses para o uso de materiais de construção.**

**Fonte: IRD (2015) *apud* GB (2010)**

Ainda países como a Sérvia estabelecem suas próprias normas específicas para o controle da radioatividade de produtos importados, exportados ou em trânsito no país. De acordo com as normas da Sérvia, os radionuclídeos oriundos de matérias-primas como os granitos devem ser identificados tanto qualitativamente e quantitativamente para que o produto

possa ser liberado, sendo obrigatório que todos os funcionários aduaneiros portem detectores de radiação a fim de controlar a passagem desses materiais (*REPUBLIC OS SERBIA*, 2011).

Segundo as regulamentações da Sérvia não podem entrar no país mercadorias que apresentem um nível de radiação superior a 20% da radiação ambiente (*background*). Nos casos em que esse limite de 20% é ultrapassado, são adotadas medidas de proteção conforme instruções fornecidas pela Agência de Segurança Nuclear e de Proteção contra as Radiações do país (*REPUBLIC OS SERBIA*, 2011).

Na Sérvia, o controle da radioatividade é baseado em medidas realizadas por pessoas legalmente autorizadas. Para mercadorias importadas, exportadas ou em trânsito é exigido um certificado de radioatividade que, no caso das rochas graníticas, deve incluir medidas de radiação  $\gamma$ . Excepcionalmente, medidas de partículas  $\beta$  e  $\alpha$  podem ser solicitadas (*REPUBLIC OS SERBIA*, 2011).

Nos casos em que sejam constatadas mercadorias que apresentem radionuclídeos acima dos limites prescritos, as rochas graníticas podem ser devolvidas ao país de origem e a importação do produto pode ser proibida dependendo do entendimento da Agência responsável da República da Sérvia (*REPUBLIC OS SERBIA*, 2011).

A União Europeia impôs, em 2006, uma política de controle de substâncias químicas importadas. A normatização denominada de REACH (*Register Evaluation and Authorization of Chemicals*) regulamenta que todas as substâncias químicas a serem exportadas para a União Europeia, sejam elas comercializadas como tal ou como componentes de preparações e de artigos, devem se ajustar as determinações da norma (IBRAM, 2008).

A Agência Europeia intitula a REACH como regulamentação que tem como objetivo buscar garantir a proteção da saúde humana e do meio ambiente (EU-OSHA, 2006). Apesar da legislação não se aplicar diretamente a substâncias radioativas, a REACH afeta o setor de rochas ornamentais no caso em que as rochas graníticas são polidas por meio de substâncias como resinas.

Considerando que o polimento das placas de granito pode auxiliar na diminuição da exalação do gás radônio do material torna-se relevante, também, o atendimento da REACH.

Nesse panorama se faz necessário que, para garantir a competitividade no mercado de rochas, as empresas brasileiras (marmorarias) realizem a avaliação e implementação de medidas de controle da radioatividade proveniente das rochas graníticas comercializadas nacionalmente e internacionalmente. Tal controle deve ser realizado considerando as exigências de organismos internacionais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para a elaboração do protocolo de controle de concentração de radônio proveniente de rochas graníticas, a ser aplicado por empresas do segmento de marmoraria.

O protocolo de controle foi desenvolvido com base em medidas realizadas nos ambientes internos de uma marmoraria (ambientes *indoor*) da cidade de Curitiba, no fluxo de trabalho da mesma e em estudos das concentrações do gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ ) proveniente de amostras das rochas graníticas que são comercializadas pela empresa de marmoraria que cedeu as amostras para a pesquisa.

As medidas das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  das rochas graníticas analisadas foram realizadas com os equipamentos AlphaGUARD (Saphymo GmbH), RAD7 (DurrIDGE Company) e detectores de estado sólido (SSNTD) CR-39. Já, as concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  foram obtidas por meio do equipamento RAD7.

A marmoraria, objeto de estudo deste trabalho, foi selecionada devido a uma parceria estabelecida entre o Laboratório de Pesquisa de Física Nuclear Aplicada, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e a empresa que, voluntariamente, se ofereceu para contribuir com o desenvolvimento desta pesquisa. Localizada na cidade de Curitiba/Paraná, a empresa desempenha atividades de serragem e beneficiamento de granitos há pelo menos 45 anos. A pedido da mesma o seu nome não será identificado neste trabalho.

#### 3.1 Amostras de rochas graníticas

Na marmoraria foram fornecidas 24 amostras de granitos de blocos brutos provenientes de pedreiras dos estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul.

O fluxo de entrada de matéria-prima (granitos) na marmoraria é variável, já que o mesmo depende da demanda do mercado consumidor. Além disso, a logística de entrada e de movimentação de granitos é influenciada pela organização da empresa, que contempla em sua estrutura física um depósito de blocos e um barracão para o armazenamento de chapas.

Dessa forma, a logística de movimentação de materiais influenciou nas variações de rochas graníticas que foram coletadas para análise neste trabalho.

As amostras de granito recolhidas da marmoraria apresentam superfícies irregulares e tamanhos diferentes, já que as mesmas correspondem a pedaços retirados das bordas dos blocos brutos das rochas graníticas.

Neste trabalho, optou-se pela retirada de amostras (refugo) das bordas dos blocos brutos de granito, de forma a não acarretar em perda do material que, posteriormente, seria beneficiado pela marmoraria.

Além disso, o uso de amostras de granitos irregulares, correspondentes às bordas que serão descartadas dos blocos de granito, contribuem para que o protocolo de controle de concentrações de radônio não venha a engessar os processos de produção que ocorrem normalmente nas empresas de marmoraria, já que que nesse caso não há a necessidade de padronização de tamanho de amostra e formato.

A Figura 16 mostra um bloco bruto de granito, juntamente com uma das amostras analisadas e o local do bloco de onde a mesma foi extraída.



**Figura 16- Bloco de rocha granítica e local de extração de amostra de medida.**

**Fonte: Autoria própria**

Todas as amostras de granito ao serem retiradas dos blocos brutos foram identificadas com o seu nome e um código interno de controle da marmoraria, conforme mostra a Figura 17.



**Figura 17 - Amostra de granito identificada.**

**Fonte: Autoria própria**

Um total de 24 amostras foi fornecido para estudo pela empresa de marmoraria. As variações de granito avaliadas, assim como o número de amostras do mesmo tipo, ou seja, de amostras de mesma cor e composição, estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6 – Variações de rochas graníticas avaliadas**

<b>Granito</b>	<b>Número de amostras</b>
Marrom Guaiúba	4
Verde Boreal Escuro	2
<i>Sea Foam Green</i>	3
Verde Cristal	1
Verde Filus	3
Boreal Branco	1
Preto Itapoa	2
Boreal Goudi	1
Itaipu	4
Rosa Curitiba	1
Prata Mar	2

As amostras de granito foram caracterizadas em relação a sua área superficial e volume. Para o cálculo da área superficial, todas as faces das rochas graníticas foram desenhadas em papel branco juntamente com um quadrado de 1 cm. Essas imagens foram carregadas no *software* MATLAB® que, por meio de um código desenvolvido, comparou o número de pixels do quadrado desenhado com o número de pixels existentes nos desenhos das superfícies das rochas graníticas. Dessa forma, a área em cm<sup>2</sup> das amostras de granito foi calculada pelo *software* MATLAB®.

Já, o volume dos granitos foi obtido por meio da observação do nível de deslocamento da coluna de água mediante a imersão da amostra de granito em Béquer de vidro graduado em mililitros.

A Tabela 7 mostra o volume e área superficial das 24 amostras de rocha granítica.

Tabela 7 – Variações de rochas graníticas avaliadas

<b>Rocha granítica</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área superficial (m<sup>2</sup>)</b>
Marrom Guaíba (A) 1906	0,00012	0,014
Marrom Guaíba (B) 1906	0,00012	0,015
Marrom Guaíba (C) 1917	0,00013	0,011
Marrom Guaíba (D) 1924	0,00004	0,017
Verde Boreal Escuro (A) 1919	0,00009	0,010
Verde Boreal Escuro (B) 1897	0,00027	0,019
<i>Sea Foam Green</i> (A) 1859	0,00016	0,014
<i>Sea Foam Green</i> (B) 1900	0,00015	0,018
<i>Sea Foam Green</i> (C) 1902	0,00020	0,020
Verde Cristal 1909	0,00017	0,021
Verde Filus (A) 1907	0,00014	0,017
Verde Filus (B) 1931	0,00009	0,012
Verde Filus (C) 1851	0,00011	0,016
Boreal Branco	0,00015	0,015
Preto Itapoa (A) 1779	0,00009	0,008
Preto Itapoa (B) 1904	0,00012	0,013
Boreal Goudi	0,00009	0,015
Itaipu (A) 1899	0,00011	0,013
Itaipu (B) 1899	0,00018	0,020
Itaipu (C) 1911	0,00007	0,015
Itaipu (D) 1915	0,00007	0,019
Rosa Curitiba 950	0,00010	0,015
Prata Mar (A) 1896	0,00014	0,012
Prata Mar (B) 1930	0,00012	0,018

### 3.2 Medidas das concentrações de $^{222}\text{Rn}$ na marmoraria

A estrutura física da marmoraria avaliada contempla salas de trabalho, destinadas à administração, barracões nos quais as máquinas e as rochas graníticas na forma de placas (chapas) são armazenadas e áreas ao ar livre onde os blocos brutos de granito são acondicionados.

Os ambientes *indoor* (internos) da empresa foram avaliados quanto às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e as medidas foram realizadas em todos os locais caracterizados como postos de trabalho, ou seja, em espaços físicos nos quais os funcionários da empresa permanecem trabalhando uma média diária de 8 horas sejam eles do setor de produção ou administrativo.

Os locais analisados quanto às concentrações de radônio divergem entre si, principalmente, quanto às dimensões físicas que são variadas. Entretanto, todos os ambientes são, de maneira geral, amplos e bem arejados e apresentam características semelhantes no que tange a presença de janelas e o tipo de revestimento dos pisos e paredes.

As concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  foram avaliadas através do uso de detectores passivos de estado sólido (*Etched Track Detector*) CR-39. Um total de 45 detectores foram instalados na marmoraria e permaneceram expostos por um período aproximado de três meses (92 dias). Dois detectores CR-39 foram separados como medidores de *background*.

O número de detectores CR-39 instalados foi definido de acordo com o tamanho dos ambientes físicos da marmoraria avaliada, de forma que um conjunto de detecção foi instalado a cada  $10\text{m}^2$ .

A Figura 18 ilustra a disposição física dos ambientes *indoor* avaliados na marmoraria e indica o número de detectores instalados em cada ambiente.

Os ambientes de depósito de blocos, de setor de resinagem, oficina geral e depósito de ladrilhos não foram avaliados por serem tratados de locais abertos, ou seja, sem telhado, de forma que a instalação dos detectores CR-39 foi inviabilizada, já que os filtros das câmaras de difusão seriam danificados caso chovesse influenciando, assim, na medida de radônio registrada pelo detector CR-39.



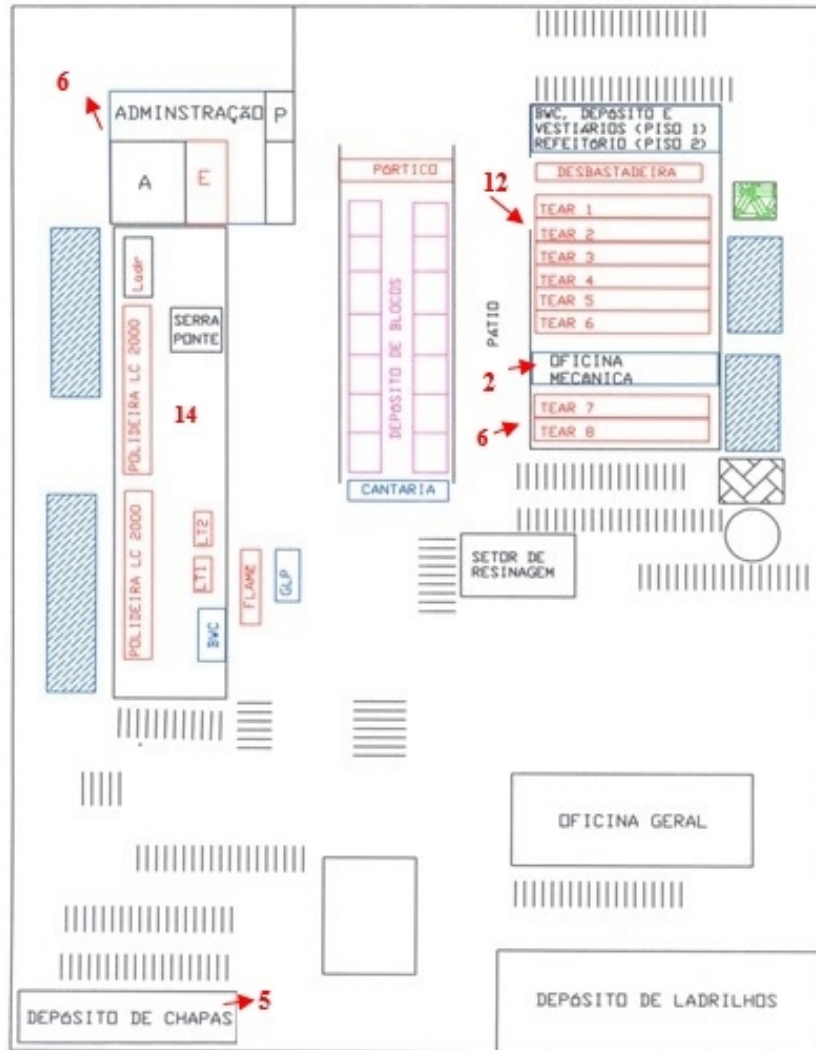


Figura 18 - Desenho esquemático da planta da marmoraria e seus respectivos ambientes.

Fonte: MARMORARIA (2015)

O CR-39 foi o detector escolhido para a avaliação das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nos ambientes por ser considerado ideal para medidas de longo prazo, de fácil manuseio, relativamente baixo, de fácil instalação e por apresentar sensibilidade adequada para medidas do gás radônio.

As partículas  $\alpha$  provenientes do decaimento do gás radônio interagem com o material plástico do detector CR-39, de forma que no local de interação um dano na estrutura física do detector é causado. Assim, os danos na estrutura do detector apresentam um formato característico denominado de traços. Mediante a contabilização dos traços é possível, por meio de cálculos matemáticos, inferir o valor médio de concentração de radônio medido no ambiente a partir do número de traços contidos no detector.

Os detectores CR-39 são destinados, normalmente, a medidas de longo prazo. Assim, o

período de três meses de instalação dos detectores é necessário para que sejam consideradas as variações de fluxo do gás  $^{222}\text{Rn}$  que ocorrem diariamente nos ambientes devido a fatores climáticos que influenciam na temperatura, umidade e no deslocamento do ar do local (WHO, 2009).

Além disso, o tempo de exposição aproximado de três meses permite que haja uma distribuição da densidade de traços na superfície do detector possível de ser analisada no momento da leitura dos mesmos (CORRÊA, 2011).

O conjunto de detecção instalado nos ambientes *indoor* da marmoraria é formado pelo detector plástico CR-39, por uma câmara de difusão e uma película de papel filtro de borossilicato (fibra de vidro) GF 52/C, de diâmetro de 37 mm (Figura 19). Detalhes do conjunto de detecção são ilustrados na Figura 20.

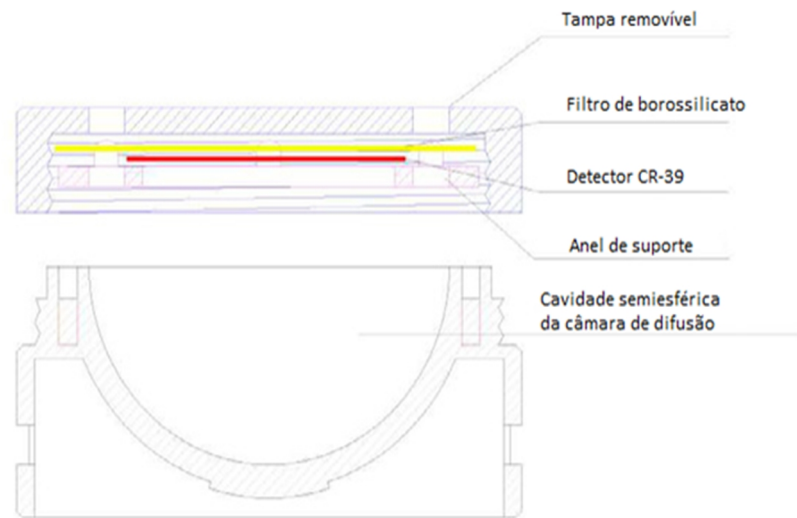


**Figura 19 - Conjunto de detecção utilizado para medidas de ambientes *indoor*.**

**Fonte: CORRÊA (2011)**

O detector, de tamanho padronizado em  $1\text{cm}^2$ , é colocado na entrada da câmara de difusão em conjunto com o filtro de microfibras de vidro para formar, assim, o conjunto de detecção que é instalado nos ambientes para a obtenção das concentrações médias do gás  $^{222}\text{Rn}$ .

A câmara de difusão semiesférica utilizada, descrita no trabalho de Urban e Piesch (1981), apresenta um volume sensível de  $7,1\text{ cm}^3$  e um diâmetro de 3 cm. Sua estrutura de fibra de carbono de alta condutividade elétrica reduz a deposição no detector CR-39 de produtos provenientes do decaimento do  $^{222}\text{Rn}$  que ficam, normalmente, aderidos nas paredes da câmara. Assim, espera-se que os traços registrados na superfície do detector sejam somente aqueles originados do decaimento direto do  $^{222}\text{Rn}$  e não dos seus demais produtos de decaimento que também emitem partículas  $\alpha$ .



**Figura 20 - Vista em corte coronal da câmara de difusão.**

**Fonte: Adaptado de FIOR *et al.*, (2012)**

O filtro colocado na entrada da câmara de difusão controla a passagem dos elementos que atravessam a tampa vazada da câmara adentrando em seu interior. A passagem dos elementos é função direta da permeabilidade do material do filtro (CORRÊA, 2006).

Dessa forma, grandes aglomerados de partículas de aerossóis podem ser impedidos de entrar na câmara de difusão não interferindo, assim, na distribuição na superfície do detector da densidade de traços das partículas  $\alpha$  do  $^{222}\text{Rn}$ .

Antes de serem instaladas, as câmaras de difusão foram submetidas a um banho de ácido etilenodiamino tetra acético (EDTA), no qual permaneceram imersas por 24 horas.

O EDTA é um composto orgânico que atua na remoção de partículas de poeiras e/ou de substâncias indesejadas que eventualmente estejam aderidas nas paredes da câmara de difusão e que podem interferir no registro de dados pelo detector CR-39. O procedimento de limpeza consiste na lavagem das câmaras com EDTA e da secagem das mesmas com papel absorvente. Após esse processo, os conjuntos de detecção são montados e lacrados em plásticos de onde serão retirados somente no local de instalação.

Cada detector CR-39 apresenta um número de série impresso pelo seu fabricante que o identifica (Figura 21).



**Figura 21 - Detector CR-39.**

**Fonte: Autoria própria**

Para a instalação dos detectores nos ambientes da marmoraria, as câmaras de difusão foram numeradas (Figura 22), e o número do detector CR-39 foi correlacionado com o número de sua respectiva câmara de difusão. Por sua vez, esses dados foram associados ao posto de trabalho no qual o conjunto de detecção foi instalado. Essa correlação entre detector, câmara e local de instalação é importante para que as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  obtidas dos detectores sejam corretamente associadas aos respectivos postos de trabalho que lhe deram origem.



**Figura 22 - Câmara de difusão numerada para a instalação.**

**Fonte: Autoria própria**

Os detectores foram instalados nos ambientes *indoor* da marmoraria a uma distância aproximada de 1,5 m das paredes, pisos e de maquinários da marmoraria que fazem uso de água no seu processo de funcionamento.

A distância de segurança de 1,5 m permite que os detectores instalados registrem

partículas  $\alpha$  provenientes do gás  $^{222}\text{Rn}$  disperso no ambiente, e que não sejam registradas partículas decorrentes de elementos existentes nos materiais de construção das paredes e pisos como, por exemplo, partículas  $\alpha$  decorrentes do decaimento do tório.

Além disso, os detectores ficam distribuídos ao nível do ar respirado pelos seres humanos, o que é fundamental para o estudo da concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  que é inalada pelos trabalhadores da empresa.

Após tempo de exposição todos os detectores CR-39, inclusive os de *background*, foram submetidos a etapa de revelação química, na qual os detectores permanecem em banho-maria em solução de 6,25M de NaOH (2% em volume) por 14 horas, a 70°C. O processo de revelação se faz necessário para que os traços presentes no detector possam ser observados com o auxílio de microscópio óptico.

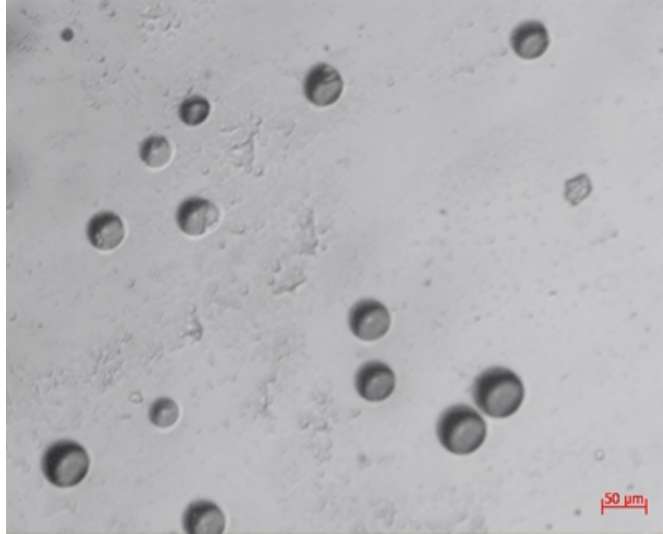
Na revelação química os danos provocados pela interação das partículas  $\alpha$  com a superfície do detector são aumentados, de forma a permitir que os traços possam ser vistos e contabilizados com o auxílio de um microscópio óptico.

Os parâmetros aplicados à revelação química, que são adotados atualmente pelo Grupo de Pesquisa do Laboratório de Física Nuclear Aplicada, advêm de metodologia pré-estabelecida por trabalhos anteriores (CÔRREA, 2006).

Apesar da metodologia de revelação atual atender às necessidades de pesquisa quanto a qualidade dos traços observados, alguns parâmetros devem ser ajustados para otimizar o processo de revelação, principalmente no que tange a redução do tempo de revelação de 14 horas. Ainda, a metodologia proposta por Corrêa (2006), foi desenvolvida com equipamentos antigos que recentemente foram substituídos por um banho-maria novo, que permite um controle mais rigoroso da temperatura durante todo o processo de revelação.

Assim, neste trabalho também foram realizados estudos experimentais com o objetivo de otimizar o processo de revelação química dos detectores CR-39. Os experimentos acerca da melhoria do processo de revelação estão descritos separadamente no item 3.2.1 deste texto.

Após a revelação química foi feita a leitura manual dos traços dos detectores expostos nos postos de trabalho da marmoraria. Para tanto, foi utilizado um microscópio com aumento óptico de 100 vezes. Segundo o estudo de Corrêa (2006), o tempo de revelação de 14 horas acarreta na obtenção de traços de tamanhos da ordem de 50 $\mu\text{m}$ , conforme mostra a Figura 23.



**Figura 23 - Imagem microscópica obtida após a revelação de um detector CR-39.**

**Fonte: CORRÊA (2011)**

A correlação entre a densidade de traços encontrada nos detectores CR-39 instalados com as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  presentes nos ambientes *indoor* avaliados na marmoraria, foi feita por meio da Equação 3.1, a qual é baseada na construção de uma curva de calibração obtida de experimentos de calibração realizados anteriormente a este trabalho (CORRÊA, 2011).

$$C = (405 \pm 30)n \text{ (Bq.cm}^2\text{.h.m}^{-3}\text{)} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Na Equação 3.1, o C corresponde a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  em  $\text{Bq/m}^3$  do ambiente *indoor* medido e n é a densidade de traços/hora de exposição obtidos em  $1 \text{ cm}^2$  do detector CR-39. A Equação 3.1 possibilita que a partir do número de traços lidos do detector seja obtida a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  detectada pelo mesmo durante o seu período de exposição no ambiente objeto de estudo.

Para a empresa de marmoraria avaliada foi entregue um parecer, conforme modelo disposto no Apêndice A, no qual foram apresentados os níveis de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  encontrados nos ambientes *indoor* avaliados e os valores limites de referência considerados normais que são estabelecidos por agências internacionais como a UNSCEAR e a ICRP.

### 3.2.1 Melhoria do processo de revelação de detectores CR-39

O processo de melhoria da revelação química dos detectores CR-39 consistiu na variação e ajuste dos parâmetros já determinados na metodologia de revelação adotada pelo Laboratório de Física de Nuclear Aplicada, e teve como finalidade proporcionar a melhor escolha dos parâmetros de temperatura, tempo de revelação e uso de etanol na solução reveladora.

O processo de melhoria de revelação foi estabelecido a partir da variação individual de cada um dos parâmetros mencionados acima.

Nesta etapa da pesquisa 140 detectores de estado sólido (SSNTD) CR-39 foram expostos, sem câmara de difusão e filtro de microfibras, a uma fonte de areia radioativa emissora de partículas  $\alpha$ .

Nesse caso, como o objetivo nessa etapa da pesquisa não era o de verificar concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  proveniente da fonte de areia radioativa, mas sim de avaliar a qualidade e quantidade de traços em cada detector após a revelação dos mesmos, optou-se pela não utilização de câmaras de difusão e filtros de microfibras no processo de exposição dos detectores.

Para a exposição os detectores CR-39 foram fixados com fita adesiva na tampa de um recipiente de material plástico de volume igual a 2 litros. A areia radioativa foi distribuída no fundo do recipiente plástico de forma a ocupar, aproximadamente, um terço do volume do mesmo.

Em cada etapa de exposição foram expostos 20 detectores por 24 horas em temperatura ambiente.

Um total de 100 detectores expostos na fonte de areia radioativa, por 24 horas, foram submetidos a tempos diferentes de revelação química (5 horas, 6 horas, 7 horas, 8 horas, 9 horas, 10 horas, 11 horas, 12 horas, 13 horas e 14 horas), de forma que foram utilizados 10 detectores para cada tempo de revelação.

Nesse experimento, tanto a solução de 6,25M de NaOH (2% em volume) como a temperatura de revelação de 70°C não foram alterados.

Na sequência, 30 detectores expostos foram submetidos ao processo de revelação com temperaturas diferentes. Assim, os detectores CR-39 foram revelados a 60°C, 80°C e 90°C em solução de 6,25M de NaOH (2% em volume) por 14 horas. Um total de 10 detectores foi submetido a revelação para cada faixa de análise da temperatura.

Por fim, 10 detectores expostos à fonte de radiação  $\alpha$  foram revelados a 70°C, em solução de 6,25M de NaOH (2% em volume), por 14 horas, sem a presença de 4 ml de etanol

utilizado na solução reveladora padrão.

Com a finalidade de otimizar o uso de detectores CR-39 disponíveis no Laboratório de Física Nuclear Aplicada, para as análises de revelação a 70°C, por 14 horas, em solução de 6,25M de NaOH (2% em volume), e de revelação com o uso de 4 ml de etanol na solução reveladora, foram utilizados para a análise os mesmos 10 detectores expostos a fonte de partículas  $\alpha$ .

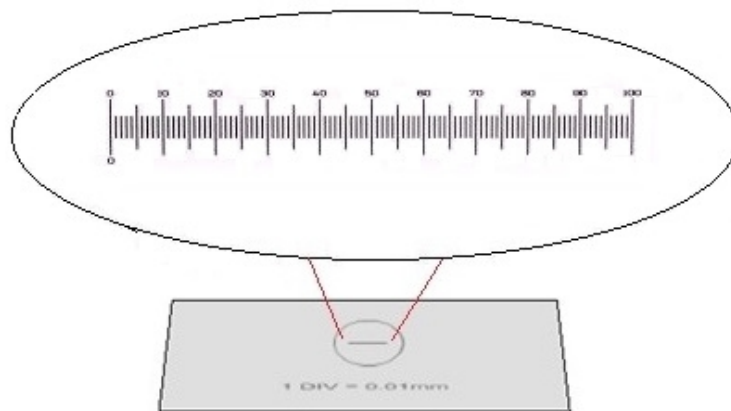
A melhoria do processo de revelação foi estabelecida a partir de análises quantitativas e qualitativas dos detectores CR-39.

Para a análise quantitativa, foram contabilizados o número de traços (densidade de traços) em uma área de 6mm<sup>2</sup> de todos os detectores expostos e revelados.

O diâmetro médio dos detectores que apresentaram características típicas dos traços, como cor escura e brilhante e formato arredondado, também foi analisado.

O diâmetro dos traços foi avaliado com o auxílio de uma lâmina de vidro com régua milimetrada para microscópio. Esta régua é colocada diretamente sobre o detector e sua medida é em escala real. Portanto, a ampliação do microscópio é aplicada sobre os traços e sobre a régua milimetrada permitindo leitura direta.

A Figura 24 ilustra a régua milimetrada presente no centro da lâmina de vidro.



**Figura 24 – Lâmina de vidro com régua milimetrada para microscópio.**

**Fonte: EIKONAL (2016)**

Ao final do processo de contabilização do diâmetro dos traços, para cada etapa de revelação, foi calculada a média dos diâmetros dos traços analisados.

Já, a análise qualitativa foi baseada na verificação do padrão de representação dos traços (formato e cor) e na viabilidade de leitura manual dos mesmos por meio de microscópio com aumento óptico de 100 vezes.



### 3.3 Estudo das rochas graníticas

Para a elaboração da proposta de protocolo de controle, além das medidas em ambientes *indoor*, foram realizadas análises das concentrações do gás  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  provenientes das rochas graníticas coletadas na marmoraria.

Conforme mencionado anteriormente no item 3 deste texto, para as medidas de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  das rochas graníticas foram utilizados os equipamentos AlphaGUARD, RAD7 e detectores de estado sólido CR-39.

Das 24 amostras de granito avaliadas com o AlphaGUARD, um total de 16 amostras apresentaram uma concentração de  $^{222}\text{Rn}$  no interior do frasco de medida superior a  $100 \text{ Bq/m}^3$ , e 14 delas foram submetidas a análise com o equipamento RAD7, que opera de modo a fornecer medidas separadas de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  durante a análise da amostra.

O valor de  $100 \text{ Bq/m}^3$  para avaliação com o equipamento RAD7 foi estabelecido como margem de segurança a ser adotada na aplicação do protocolo de controle desenvolvido neste trabalho, considerando que a *United States Environmental Protection Agency* (EPA), no ano de 2009, estabeleceu o valor limite de aceitação de  $148 \text{ Bq/m}^3$  para o nível de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  indoor (EPA, 2009).

Para a avaliação da possibilidade de elaborar uma proposta de protocolo de controle de concentração de radônio, que pudesse ser aplicado para o estudo das rochas graníticas pelas empresas de marmoraria em um curto espaço de tempo, e que demandasse de equipamentos mais baratos, um total de 10 amostras de granito, das 24 amostras coletadas na empresa de marmoraria de estudo, foram submetidas a medidas de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  por meio do uso de detectores CR-39.

As 10 amostras de granito avaliadas com detector CR-39 corresponderam as primeiras amostras submetidas a medidas com os equipamentos AlphaGUARD e RAD7. Portanto, não houve um critério específico de escolha das amostras de rochas graníticas que seriam avaliadas com o CR-39.

Dentre as amostras avaliadas com o CR-39, estavam presentes tanto rochas graníticas que apresentaram valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  acima de  $100 \text{ Bq/m}^3$  nas medidas realizadas com o AlphaGUARD, tanto granitos que apresentaram concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  mais baixas, ou seja, abaixo de  $100 \text{ Bq/m}^3$ .

A metodologia, assim como os materiais utilizados nas medidas realizadas com os equipamentos AlphaGUARD, RAD7 e CR-39 estão descritos com maiores detalhes nos itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3 do texto.

### 3.3.1 Medidas realizadas com o equipamento AlphaGUARD

O AlphaGUARD é um detector ativo utilizado para a obtenção de medidas instantâneas e contínuas do gás  $^{222}\text{Rn}$  (Figura 25). Simultaneamente as medidas de radônio, o equipamento também mede a umidade, temperatura e pressão do ar.

O modelo PQ 2000 PRO mais recente do AlphaGUARD possibilita, também, a diferenciação dos gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  na medida (SAPHYMO, 2012). Contudo, como o equipamento utilizado nesta pesquisa para as medidas de radônio é mais antigo, não foi possível obter medidas das concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  das amostras de rochas graníticas com o AlphaGUARD.

Dentre as vantagens do AlphaGUARD estão o seu fácil manuseio, capacidade de resposta rápida aos gradientes de concentração, sua sensibilidade e o fato de ser um equipamento portátil que pode ser empregado em medidas de  $^{222}\text{Rn}$  no ar, solo e água.



**Figura 25 - Equipamento AlphaGUARD (Saphymo GmbH).**

**Fonte: Autoria própria**

Para as medidas de concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  as amostras de rochas graníticas foram lacradas individualmente em frascos de vidro hermeticamente fechados por, aproximadamente, 40 dias para que o equilíbrio secular entre os radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  fosse atingido.

O equilíbrio secular é caracterizado pela condição na qual as atividades de radionuclídeos de uma mesma cadeia radioativa são iguais. Os frascos de vidro no qual as amostras de granito foram acondicionadas são apresentados na Figura 26.



**Figura 26 - Amostras de granitos lacradas em frascos de vidro.**

**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 26 é possível observar que as amostras de granito dentro dos frascos de vidro estão envoltas em um papel filtro. Esse procedimento é importante para evitar que partículas do material de granito se desloquem e se depositem no interior da câmara de ionização do AlphaGUARD no momento da medida.

A deposição no interior do equipamento de fragmentos oriundos das amostras pode alterar as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  registradas pelo AlphaGUARD, já que esses fragmentos emitirão continuamente partículas que seriam contabilizadas e acrescidas às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  registradas durante o tempo de medida.

Para cada etapa de medida foi separado um frasco de referência denominado de *background*. Nos frascos de *background* foi inserida a mesma quantidade de papel filtro utilizada para embalar as amostras de granito a serem medidas. Assim, se os filtros de papel possuísem em sua composição elementos emissores de partículas  $\alpha$ , tais níveis de radioatividade seriam detectados pelo AlphaGUARD para que o valor registrado fosse descontado dos valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  provenientes das amostras graníticas medidas.

As medidas de  $^{222}\text{Rn}$  foram realizadas em sistema fechado, de forma que o AlphaGUARD foi conectado aos frascos de medida por meio de mangueiras *tygon* e conectores de três vias.

As mangueiras *tygon* são impermeáveis ao gás  $^{222}\text{Rn}$  e, por isso, são utilizadas nos circuitos de medidas para que não haja trocas gasosas entre o ar interno ao circuito do equipamento e o ar externo ao sistema.

Os conectores de três vias utilizados permitiram que o fluxo da passagem de ar fosse aberto ou interrompido nos momentos em que o frasco de vidro era conectado e desconectado do circuito de medida, respectivamente.

A metodologia de medida dos granitos foi dividida em três etapas que obedeceram a seguinte ordem de execução: medida do frasco de *background*, medida da amostra e ventilação ativa do AlphaGUARD em circuito aberto.

A primeira medida do frasco de *background* foi adotada como o nível de referência de *background* do equipamento e, por isso, seu valor registrado, em Bq/m<sup>3</sup>, foi posteriormente descontado dos valores de concentrações de radônio obtidos nas análises das amostras.

Para todas as etapas descritas acima foi utilizada a bomba de ar AlphaPUMP do equipamento acoplada ao circuito fechado de medida.

Para as medidas de *background* e das concentrações de <sup>222</sup>Rn provenientes das amostras de granito, a bomba foi ajustada para operar com fluxo de 0,5 L/min e o AlphaGUARD foi ajustado para trabalhar no modo 10 min/*flow*, já que os tempos de medida do frasco de *background* e das amostras de granito foram de 24 horas.

Quando o equipamento opera no modo 10 min/*flow* significa que a cada 10 minutos uma medida da concentração de <sup>222</sup>Rn é registrada.

A bomba de ar ligada durante as medidas permite que o ar do circuito seja homogeneizado e que o mesmo fique circulando dentro do circuito durante todo o tempo de medida.

Uma medida de *background* foi realizada antes de cada medida de uma amostra de granito. Contudo, o valor de concentração de <sup>222</sup>Rn, referente à primeira medida de *background*, realizada após o descanso de 40 dias do frasco, correspondeu ao valor de concentração do gás <sup>222</sup>Rn descontado das concentrações de <sup>222</sup>Rn exalado das amostras de rochas graníticas.

As medições de *background* que intercalam as medidas das amostras desempenham somente função de controle, já que as mesmas se destinam à verificação de possível contaminação do AlphaGUARD que possa a vir decorrer de fragmentos oriundos da amostra que, por alguma razão, se depositem no interior do equipamento, conforme mencionado anteriormente no texto.

As medidas de *background*, intercaladas às medidas das amostras de granito, tiveram duração de uma hora. Tempo este considerado suficiente para a observação de possível contaminação do AlphaGUARD.

Além disso, cabe ressaltar que o tempo de uma hora utilizados para as medições de *background* não interferiu nos resultados das amostras, visto que somente o valor do primeiro

*background*, que foi realizado por 24 horas, foi descontado das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  obtidas das amostras.

A Figura 27 apresenta um desenho esquemático do circuito fechado utilizado para as medidas das amostras e de *background*.

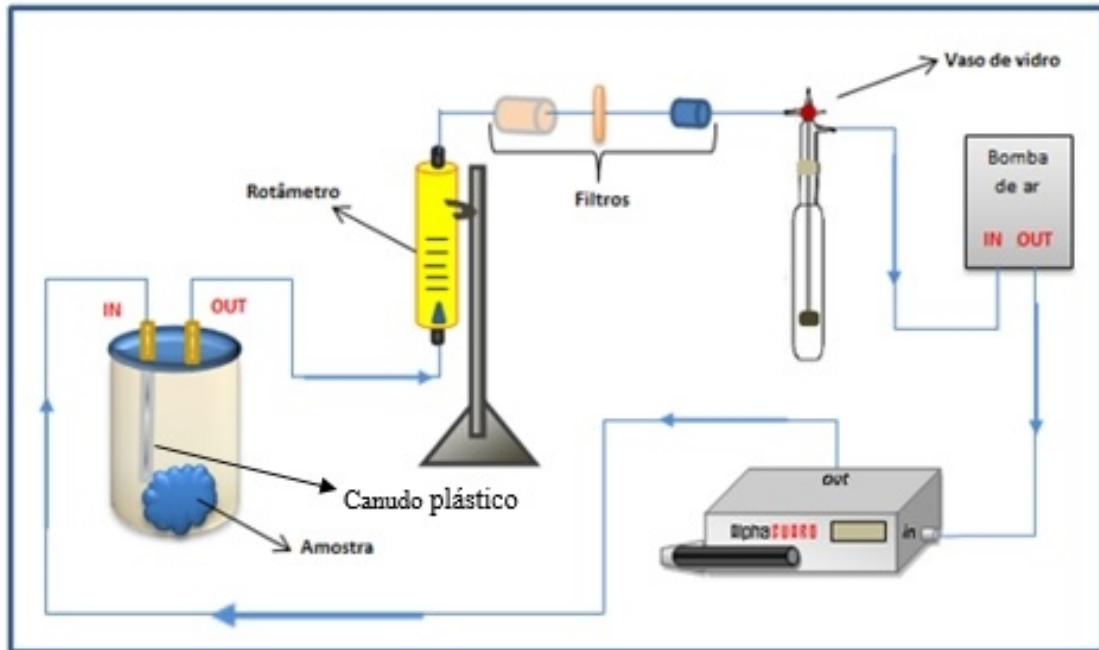


Figura 27 - Desenho esquemático do circuito fechado de medidas realizadas com o AlphaGUARD.

Fonte: Adaptado de DEL CLARO (2013)

Na Figura 27 é possível constatar que ao circuito de medida foram acoplados três filtros, um vaso de vidro e um rotâmetro. Os filtros e o vaso de vidro auxiliam no impedimento da deposição de partículas de poeira e/ou fragmentos da amostra no interior do AlphaGUARD. Já o rotâmetro é utilizado na verificação da existência de fluxo de ar no sistema.

Um canudo plástico foi inserido dentro do frasco de medida que comporta a amostra para que o ar proveniente da bomba ligada fosse direcionado para a região mais baixa do frasco, de forma a deslocar o ar com radônio para a saída do frasco de vidro em direção a câmara do AlphaGUARD.

Na etapa de ventilação a bomba de ar permaneceu ligada (ventilação ativa), mas o equipamento não. A ventilação ocorreu em circuito aberto para que o  $^{222}\text{Rn}$  presente no interior da câmara do AlphaGUARD fosse liberado para a atmosfera reduzindo, assim, os níveis de *background* do equipamento.

O ideal é que os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  indicados pelo AlphaGUARD sejam reduzidos até os níveis de referência de *background* normais do equipamento que, em geral, são menores do que  $30 \text{ Bq/m}^3$ .

Normalmente, ventilações do sistema com duração de cerca de uma ou duas horas já são suficientes para que o *background* do equipamento seja reduzido e normalizado. Contudo, com base nos experimentos realizados com as amostras de granito, observou-se que o tempo de ventilação deve ser de pelo menos 24 horas nos casos em que sejam registradas concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  das amostras superiores a  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Além disso, recomenda-se que o fluxo da bomba seja alterado de  $0,5 \text{ L/min}$  para a sua capacidade máxima de operação que corresponde a  $1,0 \text{ L/min}$ .

A etapa de ventilação também é importante para que o efeito memória do equipamento não altere os resultados das medições. Efeito esse que pode ser significativo no casos de medição de amostras de baixa exalação de radônio realizadas seguidas umas das outras, ou em curto prazo.

A Figura 28 apresenta um desenho esquemático do circuito aberto de ventilação adotado neste trabalho.

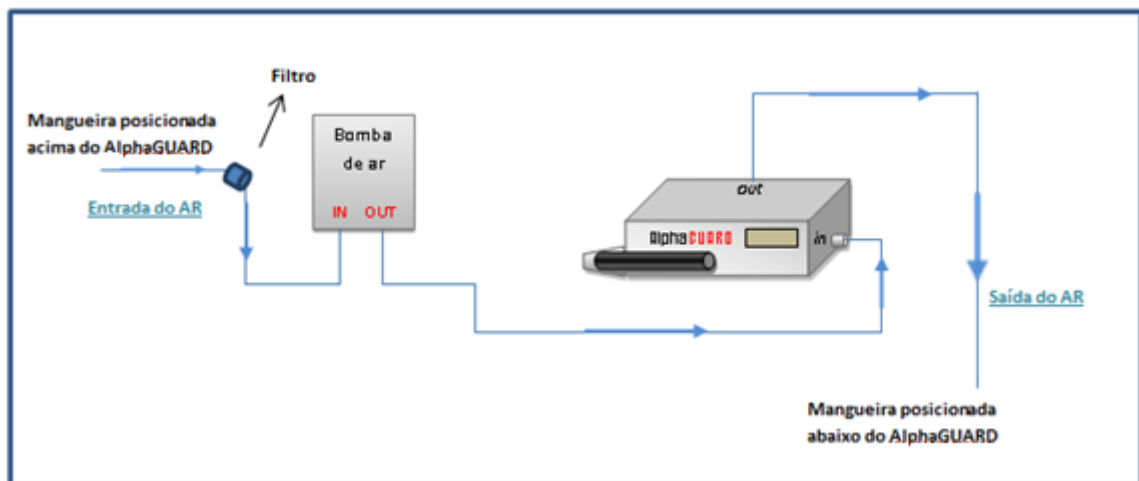


Figura 28 - Desenho esquemático do circuito de ventilação.

Fonte: DEL CLARO (2013)

Todas as amostras que apresentaram nas medidas efetuadas com o AlphaGUARD concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  iguais ou superiores a  $100 \text{ Bq/m}^3$  foram lacradas novamente e permaneceram em descanso, por 40 dias, para que a condição de equilíbrio secular fosse obtida.

Após os 40 dias de descanso, as amostras de rochas graníticas tiveram suas concentrações de radônio avaliadas com o equipamento RAD7.

### 3.3.2 Avaliação das amostras de granito com o equipamento RAD7

O RAD7 é um equipamento versátil capaz de fornecer individualmente as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  provenientes da amostra (DURRIDGE COMPANY Inc, 2016).

Conforme mencionado no item 3.3 do texto, as amostras de rochas graníticas que apresentaram concentrações acima de  $100 \text{ Bq/m}^3$  nas medidas feitas com o AlphaGUARD, foram analisadas com o RAD7.

Das 24 amostras avaliadas com o AlphaGUARD um total de 14 foi lacrada novamente para serem submetidas, após o tempo de 40 dias em condição de equilíbrio secular, às medidas com o RAD7 (Figura 29).



**Figura 29 – Detector eletrônico de radônio RAD7.**

**Fonte: DURRIDGE COMPANY Inc (2016)**

As mangueiras e vias estabelecidas no sistema de medida do RAD7 para a análise das amostras de granitos podem ser observadas na Figura 30.

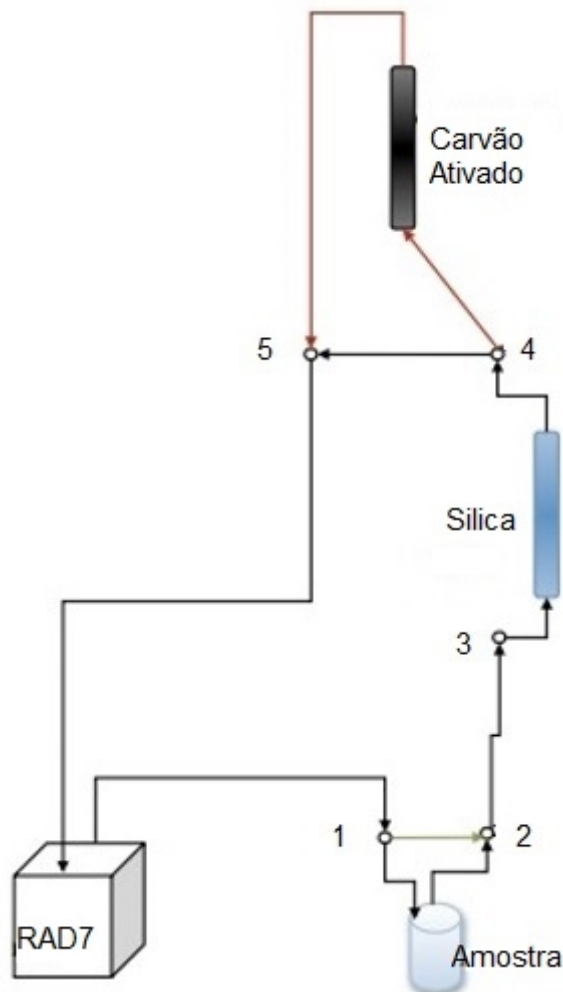


Figura 30 – Desenho esquemático do circuito de medida do RAD7.

Fonte: KAPPKE (2013)

Na Figura 30 os números 1, 2, 3, 4 e 5 indicam as vias de conexão de três vias utilizadas, assim como a posição de cada uma delas no circuito de medida.

Antes de iniciar as medidas das rochas graníticas, o sistema de conexões e mangueiras foi purgado por meio de um dissecante (sílica) associado ao carvão mineral ativado por 15 minutos, já que de acordo com as informações do manual do fabricante do RAD7 (DURRIDGE COMPANY Inc, 2009) antes da realização de medidas as vias do equipamento devem estar secas e livres de radônio.

O manual sugere, também, que a umidade relativa do ar deve estar abaixo de 5% no início da medida para que no decorrer da mesma a umidade não ultrapasse 10% o que, na prática, implica no aumento dos erros fornecidos pelo equipamento associados aos valores de medida.



Após 15 minutos, as conexões para o carvão mineral ativado foram fechadas e o sistema permaneceu purgando por mais 10 minutos. Nos casos em que mesmo após o tempo de 10 minutos a umidade permaneceu acima de 5 %, o sistema continuou purgando até que a umidade estivesse abaixo dos 5%, conforme as recomendações do fabricante. Na condição da umidade abaixo de 5%, a medida do frasco de *background* era iniciada.

Após o término da medida de *background*, o sistema era purgado novamente por meio do dissecante (sílica) por 10 minutos para que na sequência a medida da amostra de granito fosse feita.

As medidas das amostras das rochas graníticas foram intercaladas com medidas do frasco de *background*. Dessa forma, foi possível obter um maior número de medidas do *background* para que os erros associados aos cálculos finais pudessem ser diminuídos.

Para fins de cálculo, todas as medidas de *background* realizadas foram consideradas, de forma a obter um único valor de *background* a ser descontado das medidas de concentrações de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) e torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) das amostras de granito avaliadas.

Tanto para as medidas de *background*, quanto para as medidas das amostras de granito, foi utilizado o protocolo de medida WAT250 do equipamento com a bomba de ar do RAD7 ligada.

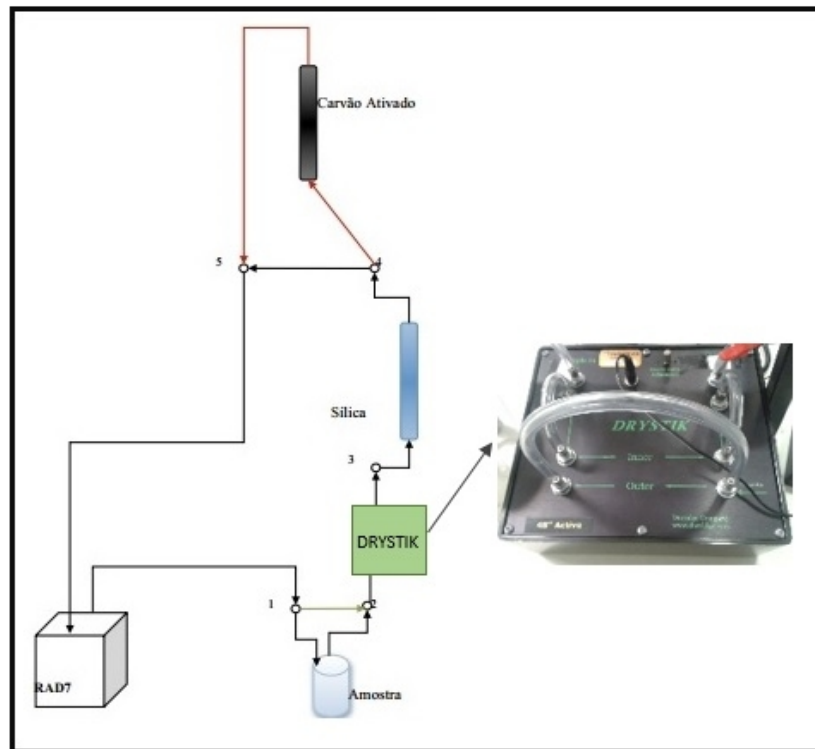
As medidas de *background* foram realizadas em quatro ciclos de 5 minutos. Já, para cada amostra de granito foram feitas medidas em 99 ciclos de 10 minutos cada.

Após a realização das medidas, os resultados dos experimentos foram transferidos para um computador, e o acesso aos dados foi feito por meio do *software* CAPTURE que acompanha o equipamento RAD7.

Além das concentrações individuais de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ , o RAD 7 também fornece demais informações associadas às medidas, como umidade, temperatura, média e desvio padrão.

No decorrer das medidas realizadas, a bomba interna do RAD7 apresentou problemas e parou de funcionar. Para que as medidas não fossem interrompidas foi acoplado ao sistema o dispositivo denominado de DRYSTIK.

De acordo com o manual do RAD7, o DRYSTIK é um dispositivo que proporciona fluxo de ar no sistema podendo substituir, assim, a bomba interna do equipamento (DURRIDGE COMPANY Inc, 2015). A Figura 31 ilustra como o circuito de medida ficou após a adição do DRYSTIK no sistema.



**Figura 31 – Desenho esquemático do circuito de medição do equipamento RAD7 com o dispositivo DRYSTIK.**

**Fonte: Adaptado de KAPPKE (2013)**

### 3.3.3 Avaliação das concentrações de $^{222}\text{Rn}$ com detector CR-39

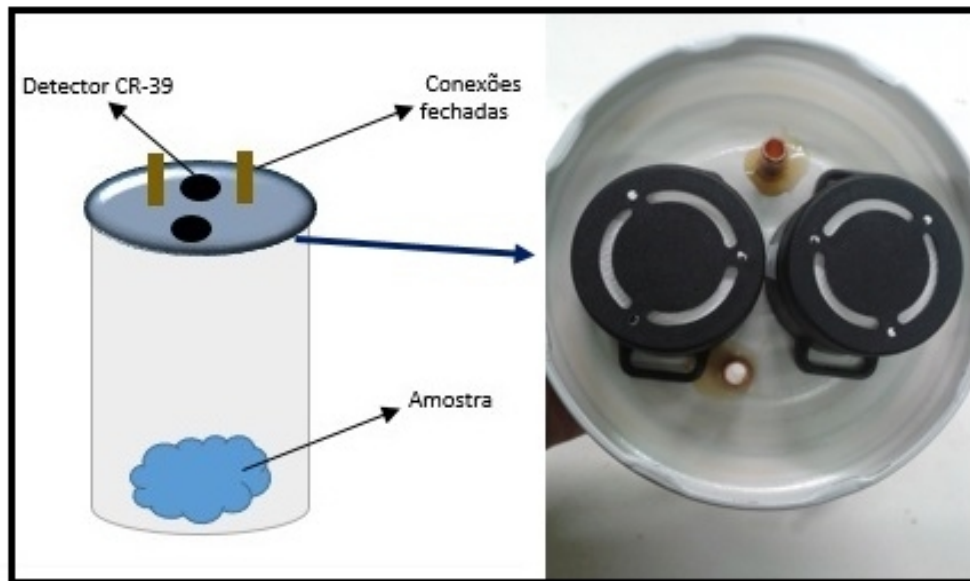
O detector CR-39 também foi empregado na avaliação das concentrações do gás  $^{222}\text{Rn}$  proveniente de rochas graníticas.

Conforme mencionado anteriormente no item 3.3, propõem-se neste trabalho que uma proposta de protocolo de controle elaborado possa ser utilizado para o estudo das rochas graníticas pelas empresas de marmoraria de forma simples e ágil, de forma que para uma análise mais simples e rápida das concentrações de radônio sejam empregados equipamentos mais baratos e de uso comum dentre os pesquisadores e laboratórios da área.

Assim, um total de 10 amostras de granito, das 24 amostras coletadas na empresa de marmoraria de estudo, foram submetidas a medidas de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  por meio do uso de detectores CR-39 posicionados dentro de câmaras de difusão com papel filtro de borossilicato.

A exposição dos detectores CR-39 às rochas graníticas foi realizada utilizando os mesmos frascos de vidro que comportaram as amostras de granito para as medidas feitas pelos

equipamentos AlphaGUARD e RAD7 (Figura 32).



**Figura 32– Disposição dos detectores CR-39 durante a exposição dos mesmos no interior dos frascos de vidro.**

**Fonte: Autoria própria**

Com a finalidade de manter um padrão na metodologia de medida no que tange a amostra, o papel filtro utilizado para embrulhar as amostras, quando as mesmas foram submetidas as medidas com o AlphaGUARD e RAD7, não foi retirado para as medidas feitas com os detectores CR-39.

O canudo plástico foi retirado do interior do frasco de vidro já que a nessa etapa de medidas a bomba de ar do AlphaGUARD não foi utilizada.

Na superfície interna das tampas dos frascos de vidro foram fixados, com o auxílio de fita adesiva, dois conjuntos (detector – câmara de difusão – filtro de microfibra) de detectores CR-39 (Figura 32). Assim, cada amostra de granito foi monitorada em relação à sua exalação de radônio, por dois detectores durante 7 dias.

Após a exposição os detectores CR-39 foram revelados, juntamente com dois detectores de *background*, em solução de 6,25M de NaOH (2% em volume) por 14 horas, e tiveram seus traços contabilizados por meio de leitura em microscópio com aumento óptico de 100 vezes.

A correlação entre a densidade de traços dos detectores e a concentração de radônio foi feita por meio da Equação 3.1.

### 3.3.4 Fluxo de exalação de radônio

O fluxo de exalação de radônio proveniente das rochas graníticas avaliadas foi calculado através da Equação 3.3.

$$F = 3,6 \times 10^3 \times \frac{C_{Rn} V_{AR}}{S} \times \lambda \quad [Bq/(m^2 \cdot h)] \quad \text{Eq. 3.3}$$

Na Equação 3.3,  $F$  corresponde ao fluxo de exalação de radônio dos granitos,  $C_{Rn}$  representa a concentração de radônio medida com equipamento AlphaGUARD em Bq/m<sup>3</sup>,  $V_{AR}$  equivale ao volume de todo o circuito de medida em litros,  $S$  corresponde a área em m<sup>2</sup> das amostras de granito e  $\lambda$  é a constante de desintegração do radônio.

A Equação 3.3 possibilita a obtenção do fluxo de exalação de radônio proveniente do granito a partir dos valores de concentração encontrados com o auxílio do equipamento AlphaGUARD. Além disso, por meio da equação é possível conhecer a relação entre o fluxo de exalação do gás radônio para o ambiente com a área da rocha granítica.

Com o objetivo de conhecer a contribuição das concentrações de radônio das rochas graníticas avaliadas para um ambiente *indoor*, os resultados do fluxo de exalação de radônio encontrados foram extrapolados para a situação em que um cômodo padrão de dimensões (5m x 4m x 2,8m) estivesse por completo revestido pelos granitos estudados.

O fluxo de exalação de radônio no cômodo padrão foi obtido por meio da Equação 3.4.

$$F_c = F \times \frac{A}{V} \quad (Bq/m^3) \quad \text{Equação 3.4}$$

Na Equação 3.4,  $F_c$  corresponde ao fluxo de exalação de radônio encontrado no cômodo padrão,  $F$  representa o fluxo de exalação de radônio das rochas graníticas calculado por meio da Equação 3.3,  $V$  é o volume do cômodo padrão em m<sup>3</sup> e  $A$  corresponde a área do cômodo padrão dada em m<sup>2</sup>.

A Equação 3.4 considera que o acúmulo da concentração de radônio no ambiente *indoor* denominado de cômodo padrão depende de uma taxa de troca de ar de 1h<sup>-1</sup>, conforme observação da UNSCEAR em seu documento que trata de exposição a fontes de radiação

natural (UNSCEAR, 2000). Por isso, o fluxo de exalação de radônio no cômodo padrão é dado em Bq/m<sup>3</sup>.

### 3.4 Protocolo de controle

A proposta de protocolo de controle elaborada neste trabalho constitui uma ferramenta de gestão, que após ser aprimorada e validada por órgãos competentes como a CNEN, poderia a ser aplicada por empresas de marmoraria no gerenciamento de atividades destinadas ao controle dos níveis de radioatividade provenientes de rochas graníticas, e na avaliação da exposição humana decorrente de tais materiais, sendo que o controle de exposição se aplica tanto a funcionários (trabalhadores da empresa) quanto a indivíduos consumidores do produto (clientes).

Duas propostas de protocolos de controle foram elaboradas neste trabalho: um para a avaliação das concentrações de <sup>222</sup>Rn em ambientes *indoor*, também denominados nesta pesquisa de postos de trabalho (Apêndice A), e outro protocolo para a avaliação da concentração de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias (Apêndice B). A elaboração de ambos os protocolos propostos foi baseada nos resultados obtidos das medidas realizadas com o equipamento AlphaGUARD, RAD7 e CR-39.

Na proposta do protocolo de medidas de radônio *indoor* em postos de trabalho as orientações com relação a limites e procedimentos técnicos são relativas a dados fornecidos por agências como a UNSCEAR e ICRP.

O protocolo para medidas de rochas graníticas foi elaborado considerando o fluxo de trabalho da marmoraria acompanhada. A Figura 33 apresenta um fluxograma resumido das principais atividades e processos envolvidos na rotina da marmoraria.

Para os casos em que o Grupo de Pesquisa do Laboratório de Física Nuclear Aplicada seja o responsável pelo acompanhamento de empresas de marmorarias, ao final de cada etapa de medida, tanto para o protocolo de medidas *indoor* quanto para o de medidas das rochas graníticas, será fornecido à empresa um parecer com informações sobre as medidas realizadas, resultados encontrados e propostas de medidas de mitigação, caso necessário.

Um modelo de parecer aplicado a medidas de concentrações de <sup>222</sup>Rn *indoor* pode ser observado no Apêndice C deste trabalho.

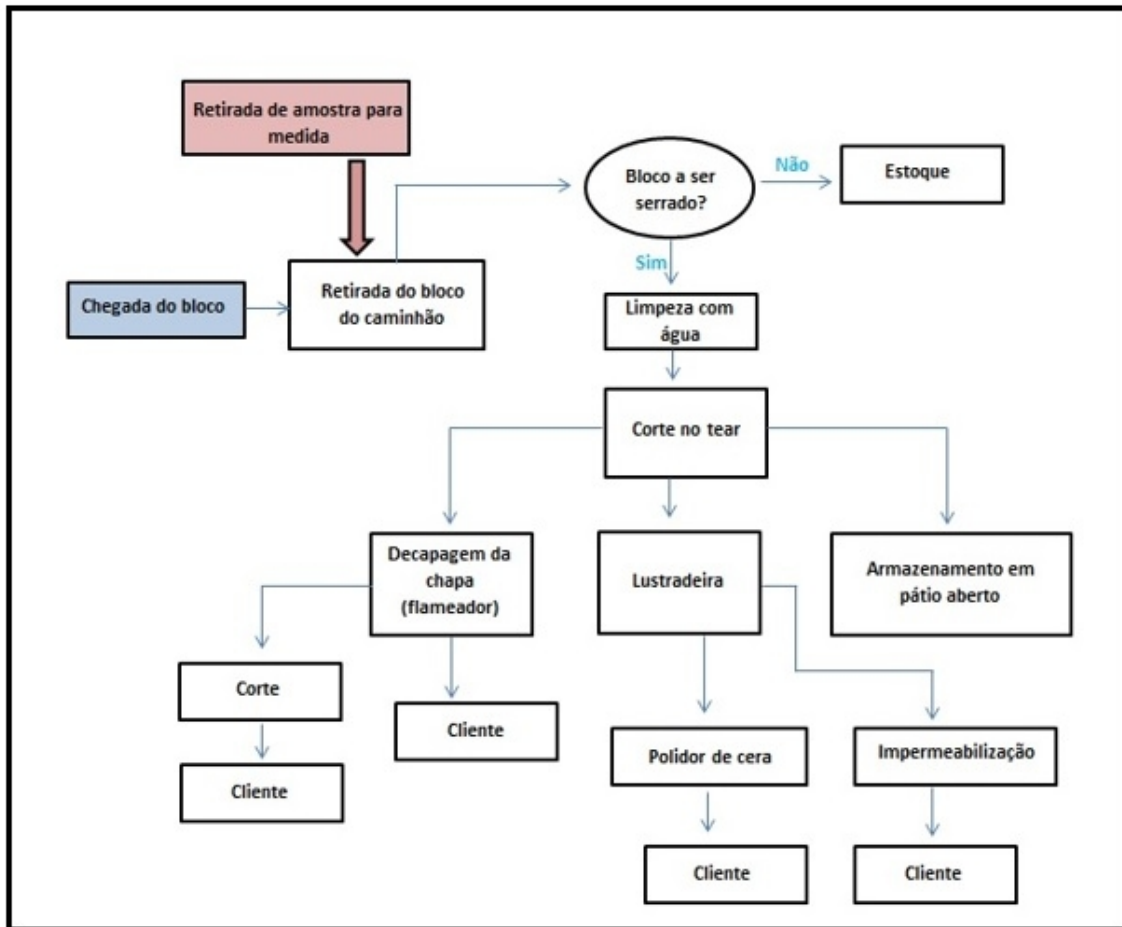


Figura 33 - Fluxograma das atividades da marmoraria.

Fonte: Autoria própria

Na Figura 33 é possível observar que, conforme proposto no protocolo de controle, a retirada das amostras a serem medidas deve ser feita no momento que os blocos de granito chegam a marmoraria, de maneira que não há necessidade de interrupção de quaisquer outros processos e/ou atividades de rotina da marmoraria para atender o protocolo de controle de radioatividade.

A proposta de protocolo para a avaliação da concentração de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias também prevê a caracterização das rochas graníticas através do uso da técnica de espectrometria gama.

A técnica de espectrometria gama fornece informações relativas à quantidade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  contidos na composição da amostra analisada. Tal informação possibilita que uma série de cálculos dosimétricos e dos índices de concentrações de atividade sejam realizados o que, por sua vez, garante uma caracterização mais completa da rocha e

permite que os riscos associados à saúde decorrentes do uso do material sejam melhor estabelecidos.

Tanto as medidas de espectrometria gama como a medida de radiação gama das amostras são importantes, principalmente nos casos de exportação do produto, considerando que a maioria dos países exige tais medidas para liberar a entrada da matéria-prima.

Apesar do protocolo de controle proposto recomendar a realização de medidas de espectrometria gama, neste trabalho as mesmas não foram realizadas, já que o Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR não possui um espectrômetro gama.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Medidas *indoor* em postos de trabalho da marmoraria

Por meio da Equação 3.1 foram calculadas as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor* e os erros associados às medidas dos 45 detectores CR-39 instalados na marmoraria de estudo.

Os resultados das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e seus erros associados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor* nos postos de trabalho da marmoraria

Detector	Tempo de exposição (dias)	Concentração de $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Erro da concentração ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )
8373884	92	48	5
8373885	92	39	4
8373835	92	53	6
8373900	92	75	8
8373890	92	53	6
8373830	92	49	5
8373894	92	61	7
8373831	92	56	6
8373590	92	218	24
8373588	92	34	4
8373589	92	52	6
8373928	92	65	7
8373926	92	82	9
8373924	92	148	16
8373591	92	35	4
8373592	92	41	5
8373896	92	41	5
8373903	92	48	5
8373837	92	44	5
8373891	92	48	5
8373836	92	79	9
8373921	92	93	10
8373902	92	50	6

(continua)



Tabela 8 – Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor* nos postos de trabalho da marmoraria

Detector	Tempo de exposição (dias)	Concentração de $^{222}\text{Rn}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Erro da concentração (Bq/m <sup>3</sup> )
8373901	92	61	7
8373886	92	82	9
8373898	92	65	7
8373899	92	90	10
8373887	92	49	5
8373888	92	72	8
8373828	92	106	12
8373832	92	42	5
8373889	92	42	5
8373834	92	39	4
8373829	92	58	6
8373833	92	36	4
8373925	92	46	5
8373929	92	42	5
8373922	92	40	4
8373927	92	47	5
8373923	92	59	6
8373893	92	54	6
8373930	92	56	6
8373584	92	82	9
8373587	92	38	4
8373585	92	36	4

Na Tabela 8 é possível observar que os valores das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  variaram de  $34 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$  a  $218 \pm 24 \text{ Bq/m}^3$ . Os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  apresentados na Tabela 8, correspondem aos valores finais das concentrações já com o desconto dos valores de concentração obtidos nos dois detectores de *background* utilizados.

Todos os detectores CR-39 instalados nos postos de trabalho da marmoraria apresentaram valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  abaixo de  $300 \text{ Bq/m}^3$ , que é o limite de segurança preconizado pela ICRP (ICRP, 2014).

Os valores de  $218 \pm 24 \text{ Bq/m}^3$ ,  $148 \pm 16 \text{ Bq/m}^3$  e  $106 \pm 12 \text{ Bq/m}^3$  correspondem aos ambientes de escritório administrativo, galpão de estoque e da operação de uma das máquinas de corte do bloco de granito (tear), respectivamente.

O interior do escritório administrativo avaliado apresenta várias pedras de granito associadas ao mobiliário e instaladas no chão e nas bancadas do ambiente. Tal fato justifica o valor de concentração de radônio encontrado.

Considerando as características de ventilação, tamanho e conservação das estruturas físicas avaliadas, já era esperado que as concentrações  $^{222}\text{Rn}$  provenientes dos ambientes *indoor* estivessem abaixo do limite de  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

Os erros associados às medidas são, em sua maioria, relativamente baixos. Tal fato pode ser associado ao sistema de calibração realizado em trabalhos anteriores pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada em parceria com demais laboratórios de pesquisa de radioatividade natural. Assim, a Equação de calibração 3.1 se mostrou adequada para o cálculo das concentrações de radônio *indoor*.

As medidas dos ambientes *indoor* realizadas na marmoraria auxiliaram no desenvolvimento da proposta do protocolo de controle.

O parecer (Apêndice C) referente às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  emitido à empresa de marmoraria avaliada apresenta os limites preconizados pela ICRP e UNSCEAR como valores comparativos de concentrações.

O parecer é um documento que tem por finalidade apenas informar os resultados encontrados em relação às concentrações de radônio medidas no ambiente, portanto o mesmo não tem valor de um laudo técnico.

A UNSCEAR estabelece que concentrações do gás radônio em ambientes *indoor* entre  $200\text{-}400 \text{ Bq/m}^3$  representam nível de atenção. Todavia, o valor de concentração de  $218 \pm 24 \text{ Bq/m}^3$  encontrado não caracteriza uma situação de risco considerando que a própria ICRP afirma atender os padrões básicos de segurança de agências como a IAEA, WHO, UNEP e EURATOM, ao estabelecer o valor limite para a concentração de radônio de  $300 \text{ Bq/m}^3$ , justificando que tal valor corresponde a uma dose anual ainda dentro dos limites de 1 a  $20 \text{ mSv}$  (ICRP, 2014).

Considerando as diretrizes da ICRP e da UNSCEAR no parecer emitido à marmoraria não foram propostas medidas mitigatórias.

Contudo, cabe ressaltar que por se tratar de um ambiente de marmoraria, no qual há um fluxo de armazenamento de rochas graníticas de origens e composições diferentes, é interessante o acompanhamento contínuo das concentrações de radônio, para que se possa conhecer as variações das concentrações ao longo do ano considerando as mudanças sazonais.

Além disso, sempre que houver mudança na estrutura física dos postos de trabalho da empresa, novas medidas com o CR-39 devem ser realizadas, a fim de analisar possíveis alterações nas concentrações de radônio em relação aos valores de concentração previamente conhecidos. Essas ações são contempladas na proposta de protocolo de controle de medidas de radônio *indoor* em postos de trabalho que pode ser observado no Apêndice A deste trabalho.

Todos os detectores instalados na marmoraria foram recolhidos, ou seja, nenhum conjunto de detecção (câmara de difusão, filtro e detector CR-39) foi extraviado.

#### 4.2 Resultados da melhoria do processo de revelação dos detectores CR-39

A proposta de melhoria do processo de revelação dos detectores CR-39 foi baseada em análise quantitativa e qualitativa dos detectores.

A média e o desvio da média obtidos para os detectores que foram revelados com tempos diferentes de revelação são apresentados na Tabela 9.

Considerando que a distribuição do número de traços ao redor da média é uma distribuição gaussiana fez-se uma análise de dados espúrios e o descarte de valores categorizados como erros grosseiros.

Tabela 9 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados com diferentes tempos

<b>Tempo de revelação (horas)</b>	<b>Média do número de traços por cm<sup>2</sup></b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Desvio da média</b>
7	1280	340	110
8	1510	460	140
9	1570	310	100
10	1550	280	90
11	1870	380	120
12	1750	280	90
13	1800	290	90
14	1670	210	70

Os detectores revelados nos tempos de 5 e 6 horas não estão contemplados na Tabela 9 por terem apresentado traços muito pequenos de difícil leitura em microscópio com aumento óptico de 100 vezes.

Assim, não foi possível a observação adequada dos traços nos detectores e os mesmos foram considerados como parte da pesquisa exploratória no que tange o critério de seleção dos tempos de revelação.

Como este trabalho tinha como proposta a melhoria do processo de revelação, também não foram revelados detectores com tempos acima de 14 horas, já que a pesquisa objetivou a diminuição do tempo de revelação com a melhor qualidade de traços possível.

Conforme os dados apresentados pela na Tabela 9, os detectores CR-39 revelados por 11 horas foram os que apresentaram um maior número de traços em 6mm<sup>2</sup> de área lida do detector. Já os detectores submetidos a tempo de revelação de 7 horas apresentaram um menor número de traços em relação a mesma área de leitura.

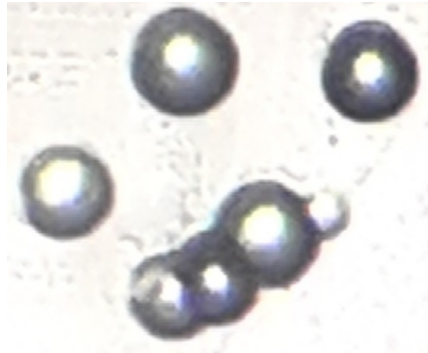
Os dados de média de número de traços e desvio médio dos mesmos foram analisados estatisticamente a fim de verificar se há diferença estatística entre os detectores. Os resultados mostraram que as informações fornecidas pelos detectores de 13 e 14 horas não são diferentes, assim como as informações analisadas nos detectores de 12 e 13 horas e entre os detectores de 12 e 11 horas de revelação.

Já, a comparação entre os traços obtidos nos detectores de 10 e 11 horas de revelação com os detectores revelados por 14 e 11 horas mostrou que estatisticamente os mesmos são diferentes.

Dentre os tempos de 10 a 8 horas de revelação não houve diferença estatística, a não ser pelos detectores revelados durante 7 horas que apresentaram traços muito pequenos e em menor número em relação aos demais detectores e que, por isso, não foram considerados como tempo ótimo de revelação.

Apesar dos detectores revelados por 11 horas terem apresentado um número médio de traços maior do que os detectores revelados por 14 horas, a qualidade dos traços deste, em termos de características típicas dos traços decorrentes das partículas  $\alpha$  provenientes do radônio, se mostrou superior ao de 11 horas.

Os traços presentes nos detectores CR-39, que são provenientes dos danos causados ao detector pela partícula  $\alpha$  do radônio, apresentam como característica típica um formato arredondado e uma coloração escura com o centro do traço brilhante, conforme mostra a Figura 34.



**Figura 34 – Características dos traços de detectores CR-39.**

**Fonte: Autoria própria**

Apesar dos detectores revelados por 12 horas não terem se mostrado estatisticamente diferentes dos detectores revelados por 11 horas, os mesmos apresentaram traços com padrões semelhantes aos que foram revelados por 14 horas.

Os detectores revelados entre 7 e 8 horas não apresentaram traços com características bem definidas como nos casos observados para os detectores revelados entre 12 e 14 horas. Além disso, os traços presentes nos detectores com tempo de revelação inferior a 11 horas apresentam diâmetros pequenos o que dificulta a leitura dos mesmos.

A Tabela 10 mostra o diâmetro médio dos traços observados nos detectores CR-39 com diferente tempo de revelação. Na Tabela 10 estão contemplados somente os diâmetros dos traços provenientes dos detectores que apresentaram melhor qualidade para leitura manual de acordo com as características típicas os traços já mencionadas anteriormente no texto.

**Tabela 10 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a diferentes tempos de revelação**

<b>Tempo de revelação (horas)</b>	<b>Diâmetro médio dos traços (mm)</b>
7	0,01
8	0,01
10	0,02
11	0,02
12	0,03
14	0,03

Na Tabela 10 é possível observar que os detectores submetidos a 12 e 14 horas de revelação apresentam o mesmo diâmetro médio dos traços (0,03 mm), e que ambos os tempos

de revelação propiciaram a obtenção de traços de maior diâmetro quando comparados aos demais detectores.

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 e na análise qualitativa dos traços, os detectores submetidos a 12 horas de revelação foram os que se mostraram mais próximos dos resultados obtidos nos detectores revelados durante 14 horas.

Caso o tempo de revelação de 12 horas fosse implementado, o processo de revelação sofreria redução de duração de duas horas em relação ao tempo de 14 horas adotado atualmente pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada como tempo ótimo de revelação.

A variação da temperatura da solução reveladora também impactou em resultados diferentes em relação à média do número de traços observados, conforme mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados em diferentes temperaturas

<b>Temperatura da solução reveladora (°C)</b>	<b>Média do número de traços</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Desvio da média</b>
90	1200	160	50
80	2040	280	100
70	1670	210	65

Os detectores revelados a 60°C apresentaram um padrão de traços muito semelhante aos detectores revelados por 5 e 6 horas que fizeram parte da pesquisa exploratória.

Considerando que os detectores revelados a 60°C apresentaram traços muito pequenos e de difícil contabilização, os mesmos foram descartados das análises por não representarem um tempo de revelação ótimo condizente com a qualidade do padrão dos traços observados nos demais detectores.

Na Tabela 11 é possível observar que os detectores revelados a 80°C apresentaram um número de traços, em uma área de 6 mm<sup>2</sup>, significativamente superior aos demais detectores revelados em temperaturas diferentes da solução reveladora.

O estudo estatístico dos dados, feito por meio da análise de quantas vezes o erro é menor do que a diferença dos valores médios dos traços encontrados, mostrou que com 95% de certeza as informações dos detectores revelados a 80°C são diferentes da informação fornecida pelos os detectores revelados a 90°C e a 80°C.

O diâmetro médio dos traços apresentado na Tabela 12 confirma a diferença de características dos traços observados nos detectores CR-39 revelados a 70°C, 80°C e 90°C.

Tabela 12 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a diferentes temperaturas de revelação

<b>Temperatura de revelação (°C)</b>	<b>Diâmetro médio dos traços (mm)</b>
90	0,06
80	0,05
70	0,03

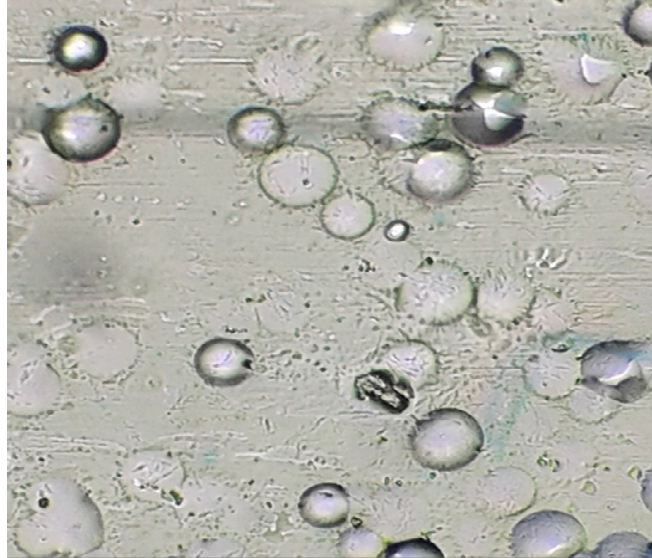
Os detectores revelados a 90°C apresentaram um diâmetro médio de traços maior do que os demais detectores, o que facilita a leitura dos mesmos em microscópio óptico.

Contudo, a temperatura de 90°C é alta para o processo de revelação, de forma que nessa condição não foi possível finalizar a revelação em 14 horas como de padrão, já que a solução reveladora secou por conta da temperatura.

Além disso, a redução na espessura do detector CR-39 revelado a 90°C é visível em relação aos demais. Fato esse que indica que várias camadas do detector foram retiradas, ou seja, perdidas durante o processo de revelação. Isso explica o porquê esses detectores apresentaram um número médio de traços menor do que os demais detectores submetidos a outras temperaturas de revelação.

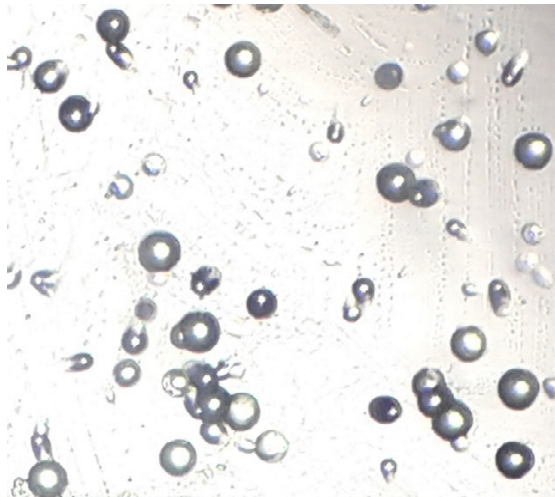
Ainda, no caso da revelação a 90°C é visível claramente em microscópio óptico que os traços perdem suas características típicas, principalmente em relação a coloração escura ficando, assim, mais transparentes, como mostra a Figura 35.

A Figura 36 mostra o padrão das características dos traços decorrentes dos detectores revelados a 70°C.



**Figura 35 – Características dos traços de detector CR-39 revelado a 90°C.**

**Fonte: Autoria própria**



**Figura 36 – Características dos traços de detector CR-39 revelado a 70°C.**

**Fonte: Autoria própria**

De acordo com os resultados relativos as médias dos números de traços e ao diâmetro médio dos mesmos, os detectores submetidos ao processo de revelação a 80°C foram os que mostraram melhores resultados quanto à quantidade de traços revelados e a qualidade dos mesmos.

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 9 e 10 e na análise qualitativa dos traços, os detectores submetidos a 12 horas de revelação foram os que se mostraram mais próximos dos resultados obtidos nos detectores revelados por 14 horas.



A revelação dos detectores com e sem 4 ml na solução reveladora também apresentaram resultados diferentes. A média do número de traços lidos em 6 mm<sup>2</sup> de área do detector e os erros associados podem ser observados na Tabela 13.

Já a média do diâmetro dos traços é mostrada na Tabela 14.

Tabela 13 – Média do número de traços e erro associado dos detectores revelados com e sem etanol

<b>Solução reveladora</b>	<b>Média do número de traços</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Desvio da média</b>
Com etanol	1670	210	70
Sem etanol	920	920	290

Tabela 14 – Diâmetro médio dos traços dos detectores submetidos a revelação com e sem etanol

<b>Solução reveladora</b>	<b>Diâmetro médio dos traços (mm)</b>
Com etanol	0,03
Sem etanol	0,04

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 13 e 14 é possível observar que os detectores revelados sem etanol na solução reveladora apresentaram um número médio de traços menor em relação aos detectores revelados com etanol. Em contrapartida, os detectores revelados sem etanol apresentaram traços com maior diâmetro e mais brilhantes, ou seja, com melhor qualidade para a leitura em relação as características típicas de formato e coloração já discutidas no texto deste trabalho.

Embora a qualidade visual dos traços seja importante no momento da leitura com microscópio para a identificação dos mesmos, a densidade de traços presentes no detector é um fator mais importante, já que a concentração de radônio final é dependente do número de traços contabilizados no detector.

Além disso, a densidade de traços no detector permite uma melhor avaliação estatística dos resultados e melhor correlação dos mesmos com as concentrações de radônio medidas em ambientes.

Assim, os detectores revelados com etanol na solução reveladora se mostram mais adequados em relação a composição ótima da solução reveladora.

Além disso, dos 10 detectores revelados sem etanol 4 apresentaram número de traços inferior a 48, um total de 2 apresentaram número de traços menor do que 617 e os 4 detectores restantes resultaram em um número de traços superior a 1100. Tal fato mostra que a revelação realizada sem etanol proporcionou uma inconstância no número de traços obtidos nos detectores, cujos quais foram revelados em conjunto sob as mesmas condições de revelação.

Com base nos resultados obtidos nos experimentos de revelação propõem-se neste trabalho como melhoria do processo de revelação o uso de solução reveladora de 6,25M de NaOH (2% volume) com 4 ml de etanol, por 12 horas a 80°C.

Cabe ressaltar que a solução de revelação ótima deve ser feita, testada e ter seus resultados avaliados antes de sua implementação efetiva.

A melhoria do procedimento de revelação está baseada na identificação de um maior número de traços no detector CR-39 de acordo com os parâmetros de revelação adotados. Todavia, a equação que relaciona o número de traços lidos com a concentração de radônio (Equação 3.1) está baseada em um protocolo de revelação diferente que fornece um menor número de traços por cm<sup>2</sup> do detector CR-39.

Dessa forma, a otimização do processo de revelação proposta neste trabalho demanda uma nova calibração envolvendo parâmetros como a eficiência da câmara de difusão, do processo de revelação dos traços, entre outros.

#### 4.3 Medidas das rochas graníticas

Os dados provenientes das medidas do equipamento AlphaGUARD foram analisados por meio do *software* DataEXPERT que acompanha o equipamento (SAPHYMO, 2012). Os valores médios de concentração de <sup>222</sup>Rn e os respectivos erros associados as medidas fornecidos pelo AlphaGUARD para cada amostra de rocha granítica estão listados na Tabela 15.

O *software* DataEXPERT faz o cálculo do erro experimental (SAPHYMO, 2012).

As medidas apresentadas na Tabela 15 correspondem às concentrações finais de <sup>222</sup>Rn após o desconto das respectivas medidas de *background*.

Tabela 15 - Concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  nas amostras de granito medidas com o AlphaGUARD

Amostra de Granito	Concentração de $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq/m}^3$ )	Erro ( $\text{Bq/m}^3$ )
Marrom Guaíba (A) 1906	1382	15
Marrom Guaíba (B) 1906	1961	19
Marrom Guaíba (C) 1917	2087	19
Marrom Guaíba (D) 1924	2050	19
Verde Boreal Escuro (A) 1919	21	1
Verde Boreal Escuro (B) 1897	11	2
<i>Sea Foam Green</i> (A) 1859	182	4
<i>Sea Foam Green</i> (B) 1900	461	8
<i>Sea Foam Green</i> (C) 1902	578	8
Verde Cristal 1909	94	3
Verde Filus (A) 1907	21	1
Verde Filus (B) 1931	15	1
Verde Filus (C) 1851	15	1
Boreal Branco	201	5
Preto Itapoa (A) 1779	3	1
Preto Itapoa (B) 1904	10	1
Boreal Goudi 1895	161	4
Itaipu (A) 1899	732	10
Itaipu (B) 1899	1097	12
Itaipu (C) 1911	135	4
Itaipu (D) 1915	351	6
Rosa Curitiba 950	260	5
Prata Mar (A) 1896	643	9
Prata Mar (B) 1930	448	7

A concentração final de  $^{222}\text{Rn}$  proveniente dos granitos foi obtida através da subtração do valor de *background* da concentração de gás  $^{222}\text{Rn}$  medida pelo AlphaGUARD.

Como as medidas das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  das amostras de rochas graníticas foram feitas em etapas diferentes, as amostras foram associadas valores de *background* diferentes. Valores esses relativos a medida realizada no frasco de *background* que permaneceu lacrado juntamente com as demais amostras pelo período de 40 dias.

Assim, as amostras Prata Mar (A), Marrom Guaíba (B), Verde Boreal Escuro (B) e *Sea Foam Green* (B) foram associadas ao valor de *background* de  $44 \pm 16$  Bq/m<sup>3</sup>. Já, o valor de *background* descontado das demais amostras foi igual a  $17 \pm 8$  Bq/m<sup>3</sup>.

Um total de 54% das amostras medidas com o AlphaGUARD apresentaram concentrações de <sup>222</sup>Rn superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup>, sendo que 41% das 24 amostras avaliadas estão associadas a níveis de concentrações de radônio superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>.

Esses resultados podem ser considerados preocupantes se considerados os valores limites de referência estabelecidos por órgãos como a UNSCEAR e ICRP, que preconizam como limite as concentrações de 200 Bq/m<sup>3</sup> e 300 Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente. O granito do tipo Marrom Guaíba foi o que apresentou concentrações de <sup>222</sup>Rn mais altas.

As amostras do granito Preto Itapoa apresentaram as menores concentrações de radônio em relação as demais amostras e, por isso, a princípio o seu uso na construção civil pode ser considerado seguro.

As medidas das concentrações de <sup>222</sup>Rn e <sup>220</sup>Rn realizadas com o equipamento RAD7 são apresentadas na Tabela 16.

Os dados provenientes das medidas do equipamento RAD7 foram analisados por meio do *software* CAPTURE que acompanha o equipamento (DURRIDGE COMPANY Inc, 2016).

Tabela 16 - Concentrações de <sup>222</sup>Rn e <sup>220</sup>Rn nas amostras de granito medidas com o RAD7

Amostra de Granito	Concentração de	Erro	Concentração	Erro
Marrom Guaíba (B) 1906	38	11	64	22
Marrom Guaíba (C) 1917	203	15	1110	49
Marrom Guaíba (D) 1924	43	12	522	37
<i>Sea Foam Green</i> (A) 1859	94	12	32	23
<i>Sea Foam Green</i> (B) 1900	57	12	173	27
Verde Cristal 1909	27	11	33	23
Boreal Branco 1918	15	10	84	23
Boreal Goudi 1895	48	11	79	23
Itaipu (A) 1899	53	12	253	30
Itaipu (C) 1911	39	11	36	22
Itaipu (D) 1915	47	11	58	25
Rosa Curitiba 950	27	11	192	28
Prata Mar (A) 1896	1127	24	514	38
Prata Mar (B) 1930	37	11	53	22

Na Tabela 16 é possível observar que todas as amostras, com exceção da *Sea Foam Green* (A) e Prata Mar (A), apresentaram valores de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  inferiores as concentrações de  $^{220}\text{Rn}$ .

Assim, os granitos que apresentaram valores de concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  maiores do que os níveis de concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  podem ser considerados, a princípio, materiais mais seguros para o uso na construção civil, considerando que a meia-vida do  $^{222}\text{Rn}$  é de, aproximadamente, 3,8 dias e a do  $^{220}\text{Rn}$  é de 54,5 segundos (NNDC, 2015).

Na Tabela 17 são apresentados os valores totais das concentrações de radônio medidas com o equipamento RAD7.

Os erros apresentados na Tabela 17, foram calculados por meio da propagação de erros associados aos valores das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  medidos.

Tabela 17 - Concentrações de radônio final nas amostras de granito e contribuição percentual dos gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  na medida

<b>Amostra de Granito</b>	<b>Concentração de radônio total (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro</b>
Marrom Guaíba (B) 1906	102	24
Marrom Guaíba (C) 1917	1313	52
Marrom Guaíba (D) 1924	565	39
<i>Sea Foam Green</i> (A) 1859	126	26
<i>Sea Foam Green</i> (B) 1900	230	29
Verde Cristal 1909	59	25
Boreal Branco 1918	100	85
Boreal Goudi 1895	127	26
Itaipu (A) 1899	306	32
Itaipu (C) 1911	75	24
Itaipu (D) 1915	105	27
Rosa Curitiba 950	219	30
Prata Mar (A) 1896	1641	44
Prata Mar (B) 1930	91	24

Os resultados das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  obtidos com o uso dos detectores CR-39 podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18- Valores das concentrações de radônio obtidas com os detectores CR-39

<b>Amostra de Granito</b>	<b>Concentração de radônio (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Preto Itapoa (A) 1779	163	18
Preto Itapoa (B) 1904	290	32
Verde Boreal Escuro (A) 1919	57	6
Verde Boreal Escuro (B) 1897	118	13
Verde Filus (A) 1907	131	15
Verde Filus (B) 1931	73	8
Boreal Branco 1918	173	19
<i>Sea Foam Green</i> (A) 1859	158	17
Marrom Guaíba (C) 1917	653	72
Verde Filus (C) 1851	176	19

De acordo com os dados da Tabela 18, a amostra Verde Boreal (A) foi a que apresentou menor valor de concentração de radônio ( $57 \pm 6$  Bq/m<sup>3</sup>) em comparação com as demais amostras medidas. Já, a amostra Marrom Guaíba (B) foi a que apresentou o maior valor de concentração de radônio, como esperado de acordo com a ordem de grandeza dos resultados obtidos com os equipamentos AlphaGUARD e RAD7.

A Tabela 19 reúne os valores de concentração de radônio das amostras avaliadas com os equipamentos AlphaGUARD, RAD7 e detectores passivos de estado sólido CR-39.

Tabela 19- Valores das concentrações de radônio obtidas com os equipamentos AlphaGUARD, RAD7 e detectores CR-39

Amostra de Granito	Concentração de radônio e erro no CR-39 (Bq/m <sup>3</sup> )	Concentração de radônio e erro no AlphaGUARD (Bq/m <sup>3</sup> )	Concentração de radônio e erro no RAD7 (Bq/m <sup>3</sup> )
Boreal Branco 1918	173±19	201±5	100±85
<i>Sea Foam Green (A)</i> 1859	158±17	182±4	126±26
Marrom Guaíba (C) 1917	653±72	2087±19	1313±52

Os dados da Tabela 19 mostram que houve diferença em relação aos valores de concentrações de radônio medidos entre os equipamentos. Todavia, independente do equipamento de medida as amostras apresentaram resultados coerentes em relação aos níveis de concentração de radônio, ou seja, as amostras associadas a valores de concentrações de radônio altos apresentaram níveis de concentração de radônio altos nos três equipamentos de medida.

Embora as medidas com os detectores CR-39 sejam mais demoradas, a calibração desses detectores está mais precisa, de forma que o valor das concentrações de radônio está mais estabelecido em torno do valor médio verdadeiro.

Já o equipamento AlphaGUARD apresenta uma precisão maior, mas uma acurácia menor mesmo estando calibrado.

O equipamento RAD7 se destaca pela vantagem de fornecer separadamente os valores de concentração de <sup>222</sup>Rn e <sup>220</sup>Rn. Porém, os erros associados as medidas aumentam significativamente nos casos em que a umidade relativa do ar ultrapassa 5%.

Além disso, o equipamento RAD7 do Laboratório de Física Nuclear Aplicada utilizado não passou recentemente por calibração, de forma que o ideal seria que o equipamento seja calibrado e as medidas com o mesmo sejam repetidas.

Para que a diferença entre os valores de concentração de radônio medidos entre os equipamentos seja reduzida, sugere-se que as medidas sejam repetidas para que se tenha um maior número de dados reduzindo, assim, a diferença estatística entre os mesmos.

Apesar dos equipamentos terem apresentados valores de concentração de radônio diferentes, os resultados obtidos não alteram ou invalidam as metodologias de medidas propostas nos protocolos de controle deste trabalho.

Como parte dos resultados deste trabalho apresentam-se as propostas de Protocolo de Controle dos Apêndices A e B.

De forma geral, os resultados de algumas amostras como o da rocha granítica Marrom Guaíba se mostraram significativos frente aos limites de referência de 200 Bq/m<sup>3</sup> e 300 Bq/m<sup>3</sup> estabelecidos pela UNSCEAR e pela ICRP, respectivamente.

Nesses casos, é importante que a caracterização das amostras quanto aos seus radionuclídeos constituintes seja feita por meio do uso de equipamento de espectrometria gama. Ainda, considerando não somente a questão da proteção radiológica dos trabalhadores e indivíduos do público em geral, mas também a questão de exportação das rochas graníticas é importante que medidas de radiação gama sejam realizadas.

Para os casos em que os valores de concentração de radônio ultrapassem os limites estabelecidos pelas agências internacionais, devem ser implementadas medidas mitigatórias.

Alguns processos, como o de polimento, desenvolvidos normalmente dentro das marmorarias, podem representar a solução integral ou parcial dos problemas de exalação pelas rochas graníticas de altas concentrações de radônio. Já que no polimento é aplicada na superfície da chapa de granito uma cera na forma líquida ou em pasta que fornece acabamento e brilho a peça final.

Tal cera pode fechar os poros do material de granito de forma a impedir a exalação dos gases <sup>222</sup>Rn e <sup>220</sup>Rn do interior do granito para a atmosfera.

#### 4.4 Medidas do fluxo de exalação de radônio proveniente de rochas graníticas

Os resultados encontrados para o fluxo de exalação de radônio dos granitos avaliados são apresentados na Tabela 20.



Tabela 20- Fluxo de exalação de radônio de rochas graníticas

<b>Granito</b>	<b>F [Bq/(m<sup>2</sup>h)]</b>
Marrom Guaíba (A)	9,551628
Marrom Guaíba (B)	0,001293
Marrom Guaíba (C)	0,001946
Marrom Guaíba (D)	0,001225
Verde Boreal Escuro (A)	0,000021
Verde Boreal Escuro (B)	0,000005
<i>Sea Foam Green</i> (A)	0,000130
<i>Sea Foam Green</i> (B)	0,000256
<i>Sea Foam Green</i> (C)	0,000293
Verde Cristal	0,000045
Verde Filus (A)	0,000012
Verde Filus (B)	0,000012
Verde Filus (C)	0,000010
Boreal Branco	0,000136
Preto Itapoa (A)	0,000004
Preto Itapoa (B)	0,000008
Boreal Goudi	0,000111
Itaipu (A)	0,000560
Itaipu (B)	0,000538
Itaipu (C)	0,000092
Itaipu (D)	0,000191
Rosa Curitiba	0,000169
Prata Mar (A)	0,000545
Prata Mar (B)	0,000254

Os valores de fluxo de exalação de radônio encontrados para o cômodo padrão, utilizando a observação da UNSCEAR em relação a taxa de troca de ar de 1h<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 2000) são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21- Fluxo de exalação de radônio em cômodo padrão

<b>Granito</b>	<b>Fc (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Marrom Guaíba (A)	15,42	0,17
Marrom Guaíba (B)	21,00	0,20
Marrom Guaíba (C)	31,42	0,30
Marrom Guaíba (D)	19,80	0,18
Verde Boreal Escuro (A)	0,34	0,02
Verde Boreal Escuro (B)	0,10	0,02
<i>Sea Foam Green</i> (A)	2,10	0,05
<i>Sea Foam Green</i> (B)	4,13	0,07
<i>Sea Foam Green</i> (C)	4,74	0,07
Verde Cristal	0,72	0,02
Verde Filus (A)	0,20	0,01
Verde Filus (B)	0,20	0,01
Verde Filus (C)	0,15	0,01
Boreal Branco	2,18	0,05
Preto Itapoa (A)	0,06	0,02
Preto Itapoa (B)	0,13	0,01
Boreal Goudi	1,80	0,04
Itaipu (A)	9,05	0,12
Itaipu (B)	8,70	0,09
Itaipu (C)	1,50	0,04
Itaipu (D)	3,10	0,05
Rosa Curitiba	2,72	0,05
Prata Mar (A)	8,80	0,12
Prata Mar (B)	4,10	0,06

Na Tabela 21, os valores de fluxo de exalação de radônio apresentados foram obtidos considerando que o cômodo padrão (5m x 4m x 2,8m) esteja recoberto por completo pela rocha granítica. Contudo, em uma situação prática somente parte do ambiente *indoor* será recoberto por granito, como o chão ou uma bancada, por exemplo. Dessa forma, a contribuição das concentrações de radônio dos materiais para o ambiente será menor.

Todavia, os resultados apresentados na Tabela 21 mostram que dependendo da quantidade de granito distribuído no ambiente o acúmulo das concentrações de radônio *indoor* pode ser significativo.

#### 4.5 Discussões acerca do Protocolo de Controle

Normalmente, em empresas de marmoraria há uma série de máquinas que utilizam água no seu processo de funcionamento. Por isso, no protocolo é previsto que os detectores CR-39 fiquem afastados a uma distância de 2,0 metros desses equipamentos.

Tal precaução evita que o filtro inserido na entrada da câmara de difusão seja danificado o que, por sua, pode prejudicar a medida.

Assim, com base na observação do funcionamento das máquinas presentes na marmoraria de estudo, determinou-se que 2,0 metros correspondem a uma distância adequada para que esse tipo de problema não aconteça.

A indicação de que no primeiro ano de implementação do protocolo as medidas devem ser executadas nas quatro estações do ano é justificada pelas diferenças de temperatura, umidade e pressão do ar inerentes as mudanças de estações, fato esse que acarreta em diferentes concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  para um mesmo ambiente.

Um estudo mais completo realizado durante um ano de medidas auxilia no entendimento das variações no comportamento das concentrações do gás nos ambientes de estudo. Caso não sejam registradas concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  anômalas, ou seja, mais altas do que o esperado, as medidas dos anos subsequentes da implantação do protocolo podem assumir periodicidades diferentes.

O detector CR-39 é apontado, no protocolo de controle proposto para avaliação da radioatividade proveniente de granitos, como uma possibilidade de equipamento que pode ser empregado nas medidas das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$ .

Essa proposta pode ser adotada pelas empresas de marmorarias como sendo a primeira análise a ser realizada das rochas graníticas, porque o resultado das medidas é obtido muito mais rapidamente do que quando as medições são feitas com o detector AlphaGUARD, por exemplo, já que a amostra necessita ficar lacrada por 40 dias devido a necessidade da condição de equilíbrio secular entre os radionuclídeos.

Para as medidas a serem efetuadas com detectores ativos (AlphaGUARD e RAD7), o protocolo não prevê a retirada de amostras de tamanho e formas regulares. Para fins de cálculo, a padronização desses parâmetros das amostras seria interessante. Contudo, o protocolo precisa ser prático e não ser dispendioso, de forma que padronizar tais características das amostras retiradas impactaria em aumento de custos e tempo para a empresa de marmoraria.

Além disso, as amostras utilizadas neste trabalho correspondem a pedaços do bloco granítico que normalmente são extraídos no processo de beneficiamento da rocha. Assim, as amostras são mais fáceis de serem retiradas e não impactam e nenhum custo adicional à empresa.

A retirada de amostras para medida das etapas de decapagem, polimento e impermeabilização (Figura 33) pode ser proposta para a elaboração de possíveis medidas de

mitigação, já que tais processo tendem a fechar os poros do material o que, provavelmente, diminuiria a exalação do gás radônio do interior do granito para a atmosfera.

O uso do equipamento RAD7 é indicado no protocolo para medidas realizadas previamente com o equipamento AlphaGUARD cujas as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  sejam maiores do que  $100 \text{ Bq/m}^3$ . Tal sugestão foi implementada no protocolo devido ao fato do RAD7 fornecer dados individuais acerca das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$ .

Para medidas mais elevadas as informações fornecidas pelo equipamento RAD7 de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  são relevantes, já que o  $^{222}\text{Rn}$  é o radionuclídeo de maior preocupação devido a sua meia-vida. Assim, é importante discriminar os percentuais de composição de  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  na medida realizada.

Por fim, o protocolo propõe a caracterização das rochas graníticas através do uso da técnica de espectrometria gama. Essa técnica permite que se saiba quanto dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  está contido na composição da amostra analisada. Tal informação possibilita que uma série de cálculos dosimétricos sejam realizados o que, por sua, vez garante uma caracterização mais completa da rocha e permite que os riscos associados à saúde decorrentes do uso do material sejam melhor estabelecidos.

Ao se traçar uma visão gerencial do processo de implementação dos protocolos propostos, destaca-se como vantagem a associação do valor de qualidade às empresas de marmorarias. Qualidade esta que pode que se manifestar, a princípio, em um nível específico do processo produtivo, por exemplo, nas exportações, já que num primeiro momento há a impossibilidade de usar tal vantagem como propaganda devido a associação do granito a radiação.

Assim, em um cenário de concorrência a implementação de um protocolo de controle das concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas representa uma vantagem com limitações.

Também é importante destacar a questão operacional da implementação do protocolo, já que a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão nacional responsável pela supervisão e fiscalização dos procedimentos que acerca da radioproteção no país. Assim, somente a CNEN é autorizada a emitir laudos.

Grupos de pesquisa, como o do Laboratório de Física Nuclear Aplicada, podem auxiliar na prática com a emissão de pareceres técnicos. Todavia, para os casos de exportação as empresas de marmoraria necessitam de um laudo técnico a ser apresentado ao país ao qual se destina a rocha granítica.

Para a implementação dos protocolos de controle as empresas de marmoraria teriam que permitir a entrada e o acesso total dos grupos de pesquisa a todos os processos e áreas físicas da empresa.

No caso da marmoraria de estudo, por se tratar de um trabalho de pesquisa o processo de medidas relacionados a elaboração dos protocolos de controle foi gratuito para a empresa de marmoraria e o mesmo se baseou numa colaboração de sinergia.

Contudo, a implementação dos protocolos de controle e a realização de medidas de monitoração envolvem custos que devem ser somados aos custos de operação das empresas de marmoraria.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões gerais

Duas propostas de protocolos para mediação de radônio proveniente de rochas graníticas em marmorarias foram elaboradas: um protocolo para medidas de radônio *indoor* em postos de trabalho de marmorarias e um protocolo de medição das concentrações de radônio proveniente de rochas graníticas.

A elaboração das propostas de protocolo se baseou no estudo dos níveis de concentração dos gases  $^{222}\text{Rn}$  e  $^{220}\text{Rn}$  decorrentes de rochas graníticas brasileiras e presentes nos ambientes *indoor* caracterizados como postos de trabalho da marmoraria.

Com relação as medidas de  $^{222}\text{Rn}$  realizadas com detectores CR-39 nos postos de trabalho da marmoraria (medidas *indoor*) os resultados das concentrações mostraram-se dentro da normalidade, variando de  $34 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$  a  $218 \pm 24 \text{ Bq/m}^3$ , sendo que nenhum valor encontrado ultrapassou o limite de  $300 \text{ Bq/m}^3$  preconizado pela ICRP. Assim, não houve a necessidade de uma investigação mais minuciosa e de elaboração de propostas mitigatórias.

Os níveis de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  das rochas graníticas medidos com o equipamento AlphaGUARD variaram de  $3 \pm 1 \text{ Bq/m}^3$  a  $2087 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$ . Já o equipamento RAD7 apresentou medidas de radônio total entre  $59 \pm 25 \text{ Bq/m}^3$  e  $1641 \pm 44 \text{ Bq/m}^3$ .

Doze de um total de quatorze amostras analisadas com o equipamento RAD7 apresentaram valores de concentrações de  $^{220}\text{Rn}$  maiores do que os valores de  $^{222}\text{Rn}$  obtidos. De forma que, o valor de  $^{222}\text{Rn}$  variou de  $15 \pm 10 \text{ Bq/m}^3$  e  $1127 \pm 24 \text{ Bq/m}^3$ , e os níveis de  $^{220}\text{Rn}$  ficaram entre  $32 \pm 23 \text{ Bq/m}^3$  e  $1110 \pm 49 \text{ Bq/m}^3$ .

Os valores de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  provenientes das amostras de rochas graníticas avaliadas por meio da exposição de detectores CR-39 variaram de  $57 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$  a  $653 \pm 72 \text{ Bq/m}^3$ .

Os experimentos de revelação realizados com os detectores CR-39 possibilitaram que melhorias no processo de revelação dos mesmos fossem propostas. Como sugestão de revelação ótima é proposto que o processo de revelação seja realizado com a solução reveladora a uma temperatura de  $80^\circ\text{C}$ , com 4 ml de etanol por 12 horas para que o processo de revelação seja mais rápido e para que os traços revelados apresentem maior qualidade em relação as suas características de cor, diâmetro e formato.

Considerando que a exposição da população a fontes de radiações naturais é reconhecida como um problema de saúde pública, é de suma importância que o setor industrial de extração

e beneficiamento de rochas graníticas esteja preparado para um novo cenário de competitividade com o advento de normas regulamentadoras destinadas a radioproteção.

Os valores de fluxo de exalação de radônio por unidade de área das rochas graníticas variaram de 0,000004 [Bq/(m<sup>2</sup>h)] a 9,551628 [Bq/(m<sup>2</sup>h)].

Já, os valores de fluxo de exalação de radônio encontrados para o cômodo padrão variaram de  $0,06 \pm 0,02$  Bq/m<sup>3</sup> a  $31,42 \pm 0,30$  Bq/m<sup>3</sup>. Tais valores foram obtidos mostram que dependendo da quantidade de granito distribuído no ambiente o acúmulo das concentrações de radônio *indoor* pode ser significativo.

Nesse contexto, a implementação dos protocolos de medição de radônio propostos vem auxiliar a adequação das empresas de marmoraria às normas regulamentadoras e a garantir a radioproteção de todos os indivíduos envolvidos no processo de comercialização de rochas graníticas como um todo.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Testar e analisar os resultados da solução de revelação proposta como ótima neste trabalho para que a proposta possa ser de fato implementada no processo de revelação dos detectores CR-39;
- Estabelecer propostas de medidas de mitigação para a redução da exalação dos gases <sup>222</sup>Rn e <sup>220</sup>Rn de granitos que possam ser implementadas pelas marmorarias e acrescidas na proposta de protocolo de medição de radônio desenvolvida;
- Realizar um maior número de medidas de diferentes tipos de rochas graníticas para a caracterização de um maior número de variedades de granito em relação aos níveis de concentrações do gás radônio.
- Avaliar as concentrações de radônio provenientes de diferentes tipos de mármore.

## REFERÊNCIAS

ABIMAQ – Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos. Barreiras Não Tarifárias. 2015. Disponível em: <<http://www.abimaq.org.br/site.aspx/Barreiras-Tarif%C3%A1rias-e-n%C3%A3o-tarif%C3%A1rias>> Acessado em: setembro, 2016.

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. **Exportações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento**. 2015. Disponível em: <[http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/18/3573/Exporta\\_Importa\\_09\\_2015.pdf](http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/18/3573/Exporta_Importa_09_2015.pdf)>. Acessado em: setembro de 2016.

ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. Radioatividade Natural em Materiais Rochosos. **ABIROCHAS Informe 18/2008**, São Paulo. 2008. Disponível em: <[http://www.ivolution.com.br/news/upload\\_pdf/6169/Radioatividade1.pdf](http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/6169/Radioatividade1.pdf)>. Acessado em: agosto de 2016.

AL-SULAITI, H.A.; REGAN, P.H.; BRADLEY, D.A.; MATTHEWS, M.; SANTAWAMAITRE, T.; MALAIN, D. **Preliminary Determination of Natural Radioactivity Levels of the State of Qatar using High-Resolution Gamma-ray Spectrometry**. In: IX Radiation Physics & Protection Conference. Nasr City – Cairo, Egypt, 2008.

ANJOS, R.M.; VEIGA, R.; MACARIO, K.; CARVALHO, C.; SANCHES, N.; BASTOS, J.; GOMES, P.R.S. Radiometric analysis of Quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast. **Marine Geology**, v. 229, n. 1-2, p. 29 – 43, 2006.

ANJOS, R.M.; UMISEDÓ, N.; DA SILVA, A.A.R.; ESTELLITA, L.; RIZZOTTO, M.; YOSHIMURA, E.M.; VELASCO, H.; SANTOS, A.M.A. Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 101, n.2, p. 153 – 158, 2010.

ANJOS, R.M.; AYUB, J.J.; CID, A.S.; CARDOSO, R.; LACERDA, T. External gamma-ray dose rate and radon concentration in indoor environments covered with Brazilian granites. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 102, p. 1055 – 1061, 2011.



AQUINO, R.R. **Avaliação da Radioatividade Natural em Mármore e Granitos Comerciais do Estado do Espírito Santo**. 2015. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2015.

ARPANSA - Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. **Naturally-Occurring Radioactive Material (NORM) in Australia: Issues for Discussion**. CEO of ARPANSA. 2005.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Radon: Prevalence, Measurements, Health Risks and Control**. ASTM, Philadelphia, 1994.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **C 615\_99 Standard specification for granite dimension stone**. Disponível em: < <http://www.astm.org>>. Acesso em: agosto de 2016a.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **E2601 – 15 Standard Practice for Radiological Emergency Response**. Disponível em: < <http://www.astm.org>>. Acesso em: agosto de 2016b.

AZEVEDO, L.R.P. **Emanação de Radônio em Rochas Ornamentais e para Revestimento do Estado do Ceará, Brasil**. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia Regional, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2013.

BAILEY, M.; ANSOBORLO, E.; ETHERINGTON, G.; GREGORATTO, D.; GUILMETTE, R.; MARSH, J.; PAQUET, F.; SMITH, J. **Proposed Updating of the ICRP Human Respiratory Tract Model**. In: IRPA, 2012. Disponível em: <<http://www.irpa12.org.ar/fullpapers/FP0947.pdf>>. Acessado em: julho, 2016.

BAIR, W.J. The ICRP Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 60, n. 4, p. 307 – 310, 1995.

BENNETT, B.G. **Assessments by Unsear of Radiation Sources and Effects**. In: IRPA 9 - International Congress on Radiation Protection. Proceedings. Volume 1. 1996. Viena, Áustria.

Disponível em: <[http://www.irpa.net/irpa9/cdrom/VOL.1/V1\\_3.PDF](http://www.irpa.net/irpa9/cdrom/VOL.1/V1_3.PDF)>. Acessado em: agosto de 2016.

BONOTTO, D.M.; JÚNIOR, W.B.L.; PAYOLLA, B.L.; BETTENCOURT, J.S.; SILVEIRA, E.G. Dose de Exposição Radiométrica de Granitos do Estado de Rondônia, Brasil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 27, p. 333- 338, n. 3, 2009.

**BRAZIL S/A**. A Importância do Brasil no mercado internacional de rochas ornamentais. Revista Brasil S/A, Brasil Original Stones, 2013.

CAMARGO, I.M.C. **Determinação da Concentração dos Isótopos Naturais de Urânio e Tório em Amostras de Água**. 1994. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1994.

CGB – Serviço Geológico do Brasil. **Relatório Anual 2013**. CPRM, 2013. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/rel\\_anual\\_2013.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/rel_anual_2013.pdf)> Acessado em: setembro de 2016.

CELA – Canadian Environmental Law Association. **Radon in Indoor Air: A Review of Policy and Law in Canada**. 2014. Canadian Environmental Law Association.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Resolução 189/15 – Nível de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil**. 2015. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm489.pdf>>. Acessado em: outubro de 2016.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **NE 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. 2014. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br>>. Acessado em: outubro de 2016.

COGLIANO, V.J.; BAAN, R.; STRAIF, K.; GROSSE, Y.; LAUBY-SECRETAN, B.; GHISSASSI, F.E.; BOUVARD, V.; BENBRAHIM-TALLAA, L.; GUHA, N.; FREEMAN, C.;

GALICHET, L.; WILD, C.P. Preventable Exposures Associated With Human Cancers. **Journal of the National Cancer Institute**, v. 107, n. 11, p. 1 -13, 2011.

CORRÊA, J.N. **Avaliação da concentração de gás radônio em ambientes de convívio humano na região metropolitana de Curitiba**. 2006. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

CORRÊA, J.N. **Avaliação dos Níveis de Concentração de Radônio em Ambientes e Águas de Poços no Estado do Paraná**. 2011. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

COSTA, L.J.P. **Estudo da Exalação de Radônio em Placas e Tijolos de Fosfocesso de Diferentes Procedências**. 2011. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2011.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Glossário**. 2015. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/estrada\\_real/glossario.html](http://www.cprm.gov.br/estrada_real/glossario.html)>. Acessado em: julho de 2016.

CSIGE, I.; SZABÓ, ZS.; SZABÓ, CS. Experimental technique to measure thoron generation rate of building material samples using RAD7 detector. **Radiation Measurements**, v. 59, p. 201 – 204, 2013.

DEL CLARO, F. **Avaliação da Concentração de Radônio-222 no Ar de Postos de Trabalho de Curitiba/PR**. 2013. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

DURRIDGE COMPANY Inc. **RAD7 RADON DETECTOR User Manual**. USA: DurrIDGE, 2009.

DURRIDGE COMPANY Inc. **RAD7 RADON DETECTOR User Manual**. USA: DurrIDGE, 2015. Disponível em: < <http://www.durrIDGE.com/documentation/RAD7%20Manual.pdf>> Acessado em: junho de 2016.

DURRIDGE COMPANY Inc. **DURRIDGE RADON INSTRUMENTATION**. USA: DurrIDGE, 2016. Disponível em: < [http://www.durrIDGE.com/products\\_rad7.shtml](http://www.durrIDGE.com/products_rad7.shtml)> Acessado em: junho de 2016.

EIKONAL – EIKONAL DO BRASIL. **Instrumentos Ópticos e Científicos LTDA**. 2016. Disponível em: < [http://www.eikonAl.ind.br/produto\\_detalhado.php?id=Mtz2Aj5A](http://www.eikonAl.ind.br/produto_detalhado.php?id=Mtz2Aj5A)> Acessado em: junho de 2016.

EISENBUD, M.; GESSEL, T. **Environmental Radioactivity From Natural, Industrial, and Military Sources**. 4 ed. California, USA: Academic Press, 1997.

EL-DINE, N.W.; EL-SHERSHABY, A.; AHMED, F.; ABDEL-HALEEM, A.S. Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 55, p. 853 – 860, 2001.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **A Citizen's Guide to Radon: The guide to protecting yourself and your family form radon**. Indoor Environments Division, 2009.

EU-OSHA - European Agency for Safety & Health at Work. **Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council**. 2006. Disponível : <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006R1907>> Acessado em: outubro de 2016.

EUROPEAN COMMISSION. **Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials**, n. 112, 1999. Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.

EVANS, R.D.; KEANE, A.T.; KOLENKOW, R.J.; NEAL, W.R.; SHANAHAM, M.M. **Radiogenic tumors in the radium and mesothorium cases studied at M.I.T, Delayed Effects of Bone-Seeking Radionuclides**. Massachussets Institute of Technology, Univ. of Utah Press, Salt Lake City, 1969.

FATHIVAND, A.A.; AMIDI, J.; NAJAFI, A. The Natural Radioactivity in The Bricks Used For The Construction of The Dwelling in Tehran Areas of Iran. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 123, p. 1 – 3, 2006.

FERREIRA, A. O. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2013.

FILHO, C.C.; CHIODI, D.K. **Relatório Técnico 33 Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento**. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23\\_RT33\\_Perfil\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_e\\_de\\_Revestimento.pdf/d6f58aa1-b01a-4da1-a178-e6052b2fc8e5](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P23_RT33_Perfil_de_Rochas_Ornamentais_e_de_Revestimento.pdf/d6f58aa1-b01a-4da1-a178-e6052b2fc8e5)> .Acessado em: junho de 2016.

FILHO, C.C.; RODRIGUES, E.P. **Guia de Aplicação de Rochas em revestimentos**. ABIROCHAS, 2009.

FIOR, L. **Análise da Concentração de Radônio Proveniente dos Materiais de Construção**. 2008. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

FIOR, L.; CORRÊA, J.N.; PASCHUK, S.A.; DENYAK, V.V.; SCHELIN, H.R.; SOREANU PECEQUILO, B.R. Activity measurements of radon from construction materials. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 70, p. 1407 – 1410, n. 7, 2012.

FUNDACENTRO - Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. **MARMORARIAS - MANUAL DE REFERÊNCIA - Recomendações de Segurança e Saúde no Trabalho**. Ministério do Trabalho e Emprego, 2008.

GUILLÉN, J.; TEJADO, J.J.; BAEZA, A.; CORBACHO, J.A.; MUÑOZ, J.G. Assessment of radiological hazard of commercial granites from Extremadura (Spain). **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 132, p. 81 – 88, 2014.

HARRISON, J. **Current and forthcoming ICRP recommendations on radon exposure**. In: International Conference on Occupational Radiation Protection. 2014. Disponível em: <<http://www-ns.iaea.org/tech-areas/communication-networks/orpnet/documents/cn223/8-hunt-presentation.pdf>>. Acessado em: agosto de 2016.

HASSAN, N.M.; ISHIKAWA, T.; HOSODA, M.; SORIMACHI, A.; TOKONAMI, S.; FUKUSHI, M.; SAHOO, S.K. Assessment of the natural radioactivity using two techniques for the measurement of radionuclide concentration in building materials used in Japan. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.283, n.1, p. 15 – 21, 2010.

HASSAN, N.M.; HOSODA, M.; IWAOKA, K.; SORIMACHI, A.; JANIK, M.; KRANROD, C.; SAHOO, S.K.; ISHIKAWA, T.; YONEHARA, H.; FUKUSHI, M.; TOKONAMI, S. Simultaneous Measurement of Radon and Thoron Released from Building Materials Used in Japan. **Nuclear Science and Technology**, v. 1, p. 404 – 407, 2011.

HOPKE, P. K.; BORAK, T. B.; DOULL, J.; CLEAVER, J. E.; ECKERMAN, K. F.; GUNDERSEN, L. C. S.; HARLEY, N. H.; HESS, C. T.; KINNER, N. E.; KOPECKY, K. J.; MCKONE, T. E.; SEXTRO, R. G.; SIMON, S. L. Health Risks Due to Radon in Drinking Water. **Environmental Science & Technology**, v. 34, n.6, 2000.

HPA – Healthy Protection Agency. **Limitation of Human Exposure to Radon**. 2010. Healthy Protection Agency.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Protection of Public against Exposure Indoors due to Radon and Other natural Sources of Radiation**, Specific Safe Guide N° SSG-32, 2015. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY

IARC – International Agency for Research on Cancer. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans**. 2006. WHO. Disponível em: <<http://monographs.iarc.fr/ENG/Preamble/CurrentPreamble.pdf>>. Acessado em: setembro de 2016.

IARC – International Agency for Research on Cancer. **Radon: Occurrence, Exposure and Analysis**. 2012. Disponível em: <<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol43/mono43-12.pdf>>. Acessado em: julho de 2016.

IARC – International Agency for Research on Cancer. **Non-ionizing and Ionizing Radiations: Recent Highlights Fatiha EL Ghissassi on behalf of the IARC Monograph Programme**. 2014. Disponível em:< <http://monographs.iarc.fr/ENG/Publications/Review2014-Radiation-Fatiha.pdf>>. Acessado em: setembro de 2016.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Indústria da Mineração**. Ano 3, n. 19, 2008.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. **ICRP 115 - Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon**. Elsevier, v. 40, n.1, 2010.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. **ICRP 119 - Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60**. ICRP Publication 119. Ann. ICRP v.41 (s), 2012.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. **ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure**. ICRP Publication 126. Ann. ICRP v. 43, n. 3, 2014.

INCA – Instituto Nacional do Câncer. Carcinogênese: mecanismo de desenvolvimento dos tumores. 2016. Disponível em: <<http://www1.inca.gov.br/situacao/arquivos/carcinogenese.pdf>>. Acessado em: junho de 2016.

IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. **O uso do índices para a classificação de rochas ornamentais**. 2015.

KAPPKE, J. **Medidas das Concentrações de Rádio em Águas Minerais Disponíveis à Venda no Brasil**. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MARMORARIA. **Fluxograma e descrições de atividades**. 2015.

MARTLAND, H.S.; CONLON, P.; KNEF, J.P. Some unrecognized dangers in the use and handling of radioactive substances. **The Journal of the American Medical Association**, v. 85, n. 23, p. 1769-1776, 1925.

MENEZES, R.G.; LARIZZATTI, J.H. **Rochas Ornamentais e de Revestimento: Conceitos, Tipos e Caracterização Tecnológica**. Módulo I – Aperfeiçoamento Tecnológico. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/publique/media/trab\\_menezes.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/trab_menezes.pdf)>. Acessado em: julho de 2016.

MINEROPAR - Minerais do Paraná SA. **Geologia do Paraná**. Disponível em: <[http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/Paineis\\_geologicos/SerradoMarl\\_portugues.pdf](http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/Paineis_geologicos/SerradoMarl_portugues.pdf)>. Acessado em: outubro de 2016.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Secretaria de Educação profissional e Tecnológica. **Rochas Ornamentais**. Brasília, 2007. Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf3/publica\\_setec\\_rochas.pdf](http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf3/publica_setec_rochas.pdf)>. Acessado em: outubro de 2016.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. COORDENAÇÃO NACIONAL DE CONTROLE DE TABAGISMO - CONTAPP. **"Falando Sobre Câncer e Seus Fatores de Risco"**. Rio de Janeiro, 1996.

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

NNDC – National Nuclear Data Center. **Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory**. Disponível em: <[www.nndc.bnl.gov/chart](http://www.nndc.bnl.gov/chart)>. Acesso em: agosto de 2016.

OKUNO, E. ;YOSHIMURA, E. **Física das Radiações**. Oficina de Textos: São Paulo. 1 ed. v. 1, p. 203 – 221, 2010.



**REPUBLIC OF SERBIA. Rulebook on Radioactivity Control of Goods During the Import, Export and Transit.** Official Gazette of the Republic of Serbia, n. 44. 2011. Disponível em: <[http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/doc/vazeca\\_akta/RULEBOOK%20ON%20RADIOACTIVITY%20CONTROL%20OF%20GOODS%20DURING%20IMPORT,%20EXPORT%20AND%20TRANSIT.pdf](http://www.srbatom.gov.rs/srbatom/doc/vazeca_akta/RULEBOOK%20ON%20RADIOACTIVITY%20CONTROL%20OF%20GOODS%20DURING%20IMPORT,%20EXPORT%20AND%20TRANSIT.pdf)>. Acessado em: julho de 2016.

SANTOS, A. M. D. A.; CANÇADO, R. Z. L.; ANJOS, R. M. DOS; AMARAL, N. C. DO; LIMA, L. C. A. Características da exposição ocupacional a poeiras em marmorarias da cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 32, n. 116, p. 11–23, 2007.

SAPHYMO. **The Reference in Professional Radon Measurement - AlphaGUARD.** 2012. Manual do usuário, Saphymo. Disponível em: <[http://www.radtech.it/Data/Sites/1/media/documents/products/ag\\_pm\\_gb\\_12\\_144dpi\\_ebook.pdf](http://www.radtech.it/Data/Sites/1/media/documents/products/ag_pm_gb_12_144dpi_ebook.pdf)>. Acessado em: setembro de 2016.

SEFAZ – Secretaria de estado da Fazenda. **Tabela de Produtos NCM.** 2015. Disponível em: <[http://www.sefaz.mt.gov.br/portal/download/arquivos/Tabela\\_NCM.pdf](http://www.sefaz.mt.gov.br/portal/download/arquivos/Tabela_NCM.pdf)>. Acessado em: julho, 2016.

SES-MG – Secretaria de Estado da Saúde de Minas Gerais. **Programa de avaliação e vigilância do câncer e seus fatores de risco de Minas Gerais.** V. I, 2013.

SOUZA, A.F.C. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Doses Visando o Uso de NORM em Materiais de Construção.** 2009. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Nuclear, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.

SPÍNOLA, V.; GUERREIRO, L.F.; BAZAN, R. **A Indústria de rochas Ornamentais.** Desenbahia. 2004. Disponível em: <[http://www.desenbahia.ba.gov.br/uploads/0906201110105625Rochas\\_ornamentais.pdf](http://www.desenbahia.ba.gov.br/uploads/0906201110105625Rochas_ornamentais.pdf)>. Acessado em: outubro de 2016.

TAKARLI, M.; PRINCE-AGBODJAN, W. Temperature Effects on Physical Properties and Mechanical Behavior of Granite: Experimental Investigation of Material Damage. **Journal of ASTM International**, v. 5, n. 3, p. 1 – 13, 2008.

TAVARES, J. C. F.; MASCULO, F. S.; SILVA, F. DE A. G. **Condições de trabalho em marmorarias: um estudo de caso.** ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2000.

TILLY JUNIOR, J.G. **Física Radiológica.** Guanabara Koogan Ltda: Rio de Janeiro. 1 ed. v. 1, p. 141 – 197, 2010.

TURHAN, S.; BAYKAN, U.N.; SEN, K. Measurement of the natural radioactivity in building materials used in Ankara and assessment of external doses. **Journal of Radiological Protection**, v. 28, p. 83 – 91, 2008.

UIEDA, W.; PALEARI, L.M. **Flora e Fauna: Um dossiê ambiental.** Unesp: São Paulo. 1 ed. v.1, p. 23 – 25, 2003.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Radiation from natural sources**, annex E. 1962. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex A, 1993. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces**, annex E, v. II, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**, annex E, v. I, 2010. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

URBAN, M.; PIESCH, E. Low Level Environmental Radon Dosimetry with a Passive Track Etch Detector Device. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 1, n. 2, p. 97-109, 1981.

VASCONCELOS, D.C. **Estudo da Radioatividade Natural em Areias de Praias do Extremo Sul da Bahia Utilizando Métodos de Análises Nucleares**. 2010. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

VEIGA, R.; SANCHES, N.; ANJOS, R.M.; MACARIO, K.; BASTOS, J.; IGUATEMI, M.; AGUIAR, J.G.; SANTOS, A.M.A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO C.; BAPSTISTA FILHO, M.; UMISEDO, N.K. Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands. **Radiation Measurements**, v. 41, p. 189 – 196, 2006.

WHO – World Health Organization. **Handbook on Indoor Radon**. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

WHO – World Health Organization. **Health risk assessment**, Switzerland: WHO press, 2011.

XINWEI, L.; LINGQING, W.; XIAODAN, J. Radiometric analysis of Chinese commercial granites. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 267, n. 3, p. 669 – 673, 2006.

## APÊNDICE A – PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO *INDOOR* EM POSTOS DE TRABALHO DE MARMORARIAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

**Universidade  
Tecnológica Federal  
do Paraná**

**Laboratório de Física  
Nuclear Aplicada**

Av. Sete de Setembro,  
3165 – 80230-901 –  
Curitiba – PR Brasil  
(+55 41 3310 – 4643)

ELABORADO EM OUTUBRO 2016

### PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO *INDOOR* EM POSTOS DE TRABALHO

Esta proposta de protocolo, estabelecido pelo Grupo de Pesquisa do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR, se destina a medição das concentrações de Radônio-222 em ambientes internos (*indoor*) denominados de postos de trabalho de empresas de marmorarias. A metodologia de medida descrita por este documento foi baseada em pesquisas experimentais e em normas preconizadas por agências internacionais como as Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP.

Responsável pela execução: empresas de marmoraria em conjunto com laboratórios de pesquisa de radioatividade natural.

## I. INFORMAÇÕES GERAIS

O Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) realiza pesquisas acerca da radioatividade natural desde 2003, com o objetivo de coletar medidas, principalmente das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$ , no ar, água, solo e materiais de construção em todo território nacional. Para tanto, o Laboratório mantém parcerias com demais centros de pesquisa do Brasil, como o Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/ CNEN). Os dados coletados viabilizam o mapeamento de várias regiões do país e possibilitam análises estatísticas relevantes para o fomento de uma legislação nacional que estabeleça valores limites de referência quanto às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e os níveis de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ .

A estrutura física do Laboratório de Física Nuclear Aplicada dispõe de equipamentos de

monitoração ativa (AlphaGUARD- Saphymo GmbH e RAD7-Durridge Company), de detectores de raios X e radiação gama, de detectores de traço do tipo CR-39 e de equipamento de leitura de dosímetro termoluminescente (TLD).

## II. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

As normas relacionadas a seguir apresentam disposições internacionais que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para este protocolo. Considerando que as normas estão sujeitas a revisões, recomenda-se que sejam verificadas as edições mais recentes das normas citadas, principalmente no que tange os valores limites de referência estabelecidos para as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor*. No caso de implementação de legislação nacional a mesma deve ser atendida.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure**. Ann. ICRP v. 43, 3, 2014.

EPA – United States Environmental Protection Agency. A Citizen's Guide to Radon: The guide to protecting yourself and your family from radon. Indoor Environments Division, 2009.

EUROPEAN COMMISSION. Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, n. 112, 1999. Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex E, v. II, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

WHO – World Health Organization. **Handbook on Indoor Radon**. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

## III. INSTALAÇÃO DE DETECTORES CR-39

Fazem parte do conjunto de detecção: detector CR-39, câmara de difusão e filtro de borossilicato (microfibra de vidro) de 37 mm de diâmetro. Os detectores de estado sólido SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*) do tipo CR-39 devem ser instalados nos ambientes internos (*indoor*) da empresa de marmoraria conforme orientações a seguir:

**» Periodicidade de medida**

- No primeiro ano de implementação deste protocolo devem ser instalados detectores CR-39 nas quatro estações do ano, sendo que o período de exposição dos detectores em cada etapa de medida deve ser de 3 (três) meses.
- Após o primeiro ano de implementação deste protocolo, a instalação dos detectores CR-39 devem ser realizada obedecendo a uma periodicidade de 6 (seis) meses. Nos casos em que sejam detectadas anomalias quanto às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor* ( $> 200 \text{ Bq/m}^3$ ) (UNSCEAR, 2000) a periodicidade de monitoração ambiental com detectores CR-39 deve ser revista. Tal revisão desse ser embasada em medidas prévias realizadas no ambiente de estudo com o detector AlphaGUARD (Saphymo GmbH).
- Independente da periodicidade de monitoração descrita nos itens anteriores, sempre que houver mudanças na estrutura física dos locais de trabalho da empresa, deve ser realizada a instalação de detectores CR-39 por um período de exposição de 3 (três) meses.

**» Instruções para a instalação**

- Os detectores CR-39 devem ser instalados a uma distância média aproximada de 1,5 metros de janelas, portas, paredes, piso e afastados cerca de 2,0 metros de maquinários da marmoraria que fazem uso de água no seu processo de funcionamento.
- Todas as câmaras de difusão devem ser identificadas com numeração correlacionada ao número do detector CR-39 que irá dentro da câmara de difusão e o local exato de instalação do conjunto de detecção deve ser registrado por escrito.
- Para cada 50 detectores instalados devem ser reservados 5 (cinco) detectores para medidas de *background* (10%). Os detectores de *background* deverão permanecer nas dependências do laboratório de pesquisa durante todo o período de medida.
- Em um mesmo ambiente deve ser instalado um conjunto de detecção para cada  $10\text{m}^2$ .
- A instalação e retirada dos detectores poderá ser feita por pessoa autorizada do laboratório de pesquisa e/ou por funcionário devidamente treinado da empresa de marmoraria desde que a empresa permita.
- Informações como data e hora de instalação dos detectores, retirada, locais de instalação, nome do responsável pela instalação, responsável pela retirada dos detectores, quantidade de conjuntos de detecção instalados, entre outros, devem ser devidamente registradas e armazenadas em relatório específico.

- O Laboratório de pesquisa fica responsável por registrar os dados referentes a leitura dos detectores: equipamento utilizado, responsável pela leitura, condições de revelação química, concentrações encontradas, dentre outras informações consideradas importantes ao processo.

» **Precauções**

- Os conjuntos de detecção **não devem** ser abertos ou trocados de local de instalação em hipótese alguma durante o seu período de exposição. Os detectores serão retirados das câmaras de difusão somente no ambiente do laboratório de pesquisa, por pessoa autorizada. Todos os funcionários da empresa devem ser comunicados de que a abertura ou deslocamento dos detectores não é permitido.
- Em caso de limpeza do local, permite-se que apenas um espanar de pó ou pano limpo seja passado por fora da câmara de difusão para a retirada do acúmulo de sujeira (poeira). Todavia, orienta-se que a limpeza das câmaras de difusão seja dispensada.

#### **IV. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS**

O Laboratório de Pesquisa de Física Nuclear Aplicada emitirá um Parecer, ao final de cada etapa de medida, com informações referentes a análise de coleta de dados, resultados encontrados e recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas, caso necessário.

## APÊNDICE B – PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO PROVENIENTE DE ROCHAS GRANÍTICAS EM MARMORARIAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

**Universidade  
Tecnológica Federal  
do Paraná**

**Laboratório de Física  
Nuclear Aplicada**

Av. Sete de Setembro,  
3165 – 80230-901 –  
Curitiba – PR Brasil  
(+55 41 3310 – 4643)

ELABORADO EM OUTUBRO 2016

### PROPOSTA DE PROTOCOLO DE MEDIÇÃO DE RADÔNIO PROVENIENTE DE ROCHAS GRANÍTICAS EM MARMORARIAS

Esta proposta de protocolo, estabelecida pelo Grupo de Pesquisa do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR, se destina a medição de radônio proveniente de radionuclídeos presentes em rochas graníticas. A metodologia de medida descrita por este documento foi baseada em pesquisas experimentais e em normas preconizadas por agências internacionais como as Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR e a Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP. Este protocolo é dividido em quatro partes principais que se destinam a medidas individuais de concentrações de radônio, torônio e dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  através dos equipamentos CR-39, AlphaGUARD, RAD7 e espectrômetro gama, respectivamente. **Medidas de radiação gama devem ser realizadas para todas as amostras.**

Responsável pela execução: empresas de marmoraria em conjunto com laboratórios de pesquisa de radioatividade natural.

## I. INFORMAÇÕES GERAIS

O Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) realiza pesquisas acerca da radioatividade natural desde 2003, com o objetivo de coletar medidas, principalmente das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$ , no ar, água, solo e materiais de construção em todo território nacional. Para tanto, o Laboratório mantém parcerias com demais centros de pesquisa do Brasil, como o Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/ CNEN). Os dados coletados viabilizam o mapeamento de várias regiões do país e possibilitam análises estatísticas relevantes para o fomento de uma legislação nacional



que estabeleça valores limites de referência quanto às concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  e os níveis de atividade dos radionuclídeos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ .

A estrutura física do Laboratório de Física Nuclear Aplicada dispõe de equipamentos de monitoração ativa (AlphaGUARD- Saphymo GmbH e RAD7-Durridge Company), de detectores de raios X e radiação gama, de detectores de traço do tipo CR-39 e de equipamento de leitura de dosímetro termoluminescente (TLD).

## II. REFERÊNCIAS NORMATIVAS

As normas relacionadas a seguir apresentam disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para este protocolo. Considerando que as normas estão sujeitas a revisões, recomenda-se que sejam verificadas as edições mais recentes das normas citadas, principalmente no que tange os valores limites de referência estabelecidos para as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  *indoor*. No caso de implementação de legislação nacional a mesma deve ser atendida.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. NE 3.01 Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. 2014. Rio de Janeiro, Brasil.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. Posição Regulatória 3.01/007. Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica. Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

ICRP - International Commission on Radiological Protection. **ICRP 126 – Radiological Protection against Radon Exposure**. Ann. ICRP v. 43, 3, 2014.

EPA – United States Environmental Protection Agency. A Citizen's Guide to Radon: The guide to protecting yourself and your family from radon. Indoor Environments Division, 2009.

EUROPEAN COMMISSION. Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, n. 112, 1999. Directorate – General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2000. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex E, v. II, 2006. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation**, annex B, v. I, 2008. UNSCEAR Report to the United Nations General Assembly.

WHO – World Health Organization. **Handbook on Indoor Radon**. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

### III. MEDIDAS COM DETECTORES CR-39

Fazem parte do conjunto de detecção: detector CR-39, câmara de difusão e filtro de borossilicato (microfibra de vidro) de 37 mm de diâmetro. Os detectores de estado sólido SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*) do tipo CR-39 devem ser utilizados para medidas das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  provenientes de rochas graníticas conforme orientações a seguir:

#### » **Retirada de amostras**

- Para cada bloco bruto de granito que chega a marmoraria uma amostra deve ser retirada e, posteriormente, identificada e encaminhada ao Laboratório de Pesquisa para a realização da medida.
- Na identificação das amostras devem estar contidos o nome da rocha granítica, a pedreira de origem e o código do bloco de granito do qual a amostra foi retirada.
- Este protocolo não prevê a exigência de especificações quanto ao tamanho e regularidade da forma da amostra retirada que será encaminhada para medida.

#### » **Instruções para as medidas**

- A amostra a ser medida deve ser colocada dentro de um frasco de vidro ou ambiente similar que seja hermeticamente fechado. Pelo menos dois detectores com câmaras de difusão devem ser colocados no ambiente junto com a amostra, de maneira que a tampa da câmara de difusão permaneça voltada paralelamente para a amostra a uma distância mínima de 30 centímetros (ver figura 1).
- Para cada 50 detectores instalados devem ser reservados 5 (cinco) detectores para medidas de *background* (10%).
- Os detectores devem permanecer expostos por 7 (sete) dias. Após o tempo de exposição os detectores CR-39 devem ser submetidos ao processo de revelação química.

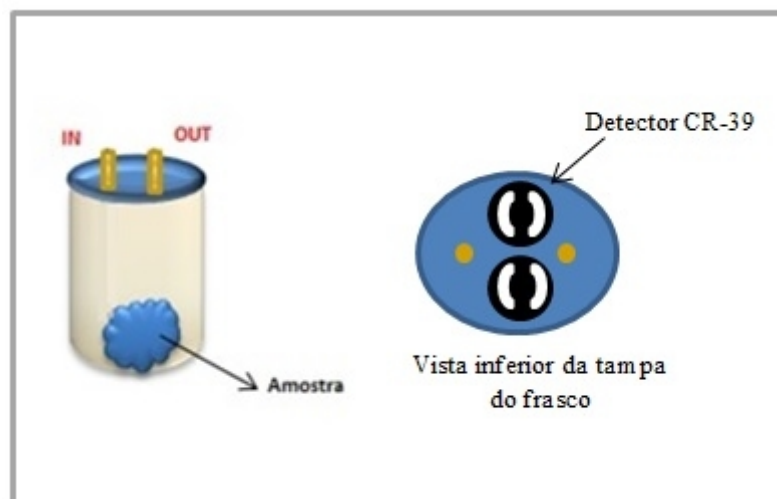


Figura 1 – Vista da instalação de detectores CR-39 para medidas de rochas graníticas

#### IV. MEDIDAS COM AlphaGUARD

Nos casos em que as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  medidas com os detectores de estado sólido CR-39 sejam superiores a  $300 \text{ Bq/m}^3$  (ICRP, 2014) recomenda-se que as amostras sejam submetidas a avaliação quanto as concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  no equipamento AlphaGUARD.

##### » Acondicionamento das amostras para medidas

- As amostras devem ser envolvidas em papel filtro e lacradas por 40 dias em frascos hermeticamente fechados para atingirem o equilíbrio secular.

##### » Instruções para as medidas

- As medidas devem ser realizadas em circuito fechado com o AlphaGUARD, no modo *10 min/flow*, conectado ao frasco de medida por meio de mangueiras tipo *tygon* e conectores de três vias.
- Um frasco contendo uma amostra do papel filtro utilizado para envolver as rochas graníticas a serem medidas deve ser reservado para ser utilizado como valor de referência de *background*. O frasco de *background* também deve permanecer lacrado por 40 dias.
- A avaliação das concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  da amostra deve ocorrer em três etapas na sequência a seguir: medida do frasco de *background*, medida da amostra e ventilação ativa do AlphaGUARD em circuito aberto.
- A medida do frasco de *background*, assim como a medida da amostra, devem ser realizadas,

por 24 (vinte e quatro) horas, em circuito fechado com o fluxo da bomba de ar AlphaPUMP ajustado em 0,5 L/min.

- A etapa de ventilação ativa deve ser realizada em circuito aberto, com o AlphaGUARD desligado e o fluxo da bomba de ar AlphaPUMP ajustado em 1,0 L/min. O tempo de ventilação a ser adotado é dependente da concentração de  $^{222}\text{Rn}$  registrada da medida da amostra medida anteriormente. Para concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  de:

$< 50 \text{ Bq/m}^3$  - tempo de ventilação de 4 (quatro) horas

$50 \text{ a } 100 \text{ Bq/m}^3$  - tempo de ventilação de 8 (oito) horas

$100 \text{ a } 1000 \text{ Bq/m}^3$  - tempo de ventilação de 24 (vinte e quatro) horas

$1000 \text{ a } 2000 \text{ Bq/m}^3$  - tempo de ventilação de 48 (quarenta e oito) horas

## V. MEDIDAS COM RAD7

Recomenda-se que sejam encaminhadas para o RAD7 somente as amostras avaliadas pelo equipamento AlphaGUARD cujas concentrações de  $^{222}\text{Rn}$  tenham sido  $\geq 100 \text{ Bq/m}^3$ . A etapa de medida com o equipamento RAD7 se destina essencialmente a avaliação individual das concentrações de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) e torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ) provenientes da amostra de granito.

### » Acondicionamento das amostras para medidas

- As amostras devem ser envolvidas em papel filtro e lacradas por 40 dias em frascos hermeticamente fechados para atingirem o equilíbrio secular.

### » Instruções para as medidas

- As medidas devem ser realizadas em circuito fechado com umidade do ar inferior a 5%.
- O valor de *background* do próprio equipamento após medida de uma hora em circuito fechado pode ser adotado como referência.
- As amostras devem ser medidas por 24 (vinte quatro) horas com a bomba de ar ligada.

## VI. ESPECTROMETRIA GAMA

O estudo pela técnica de espectrometria gama deve ser empregado nos casos em que haja a necessidade da caracterização dos radionuclídeos que compõem as rochas graníticas. Tal estudo

é indicado para situações em que há exportação das rochas. As amostras de rochas graníticas devem ter o seu teor de radionuclídeos ( $^{232}\text{Th}$  e  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{40}\text{K}$ ) analisado pelo equipamento espectrômetro gama. O resultado da análise deve ser dado em atividade específica (Bq/kg).

» **Acondicionamento das amostras para medidas**

- Para a medida as amostras devem ser trituradas e armazenadas em frascos de Marineli de 500 gramas, por 40 dias.

## **VII. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS**

O Laboratório de Pesquisa de Física Nuclear Aplicada emitirá um Parecer Técnico, ao final de cada etapa de medida, com informações referentes à análise de coleta de dados, resultados encontrados e recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas, caso necessário.

## APÊNDICE C – PARECER DAS MEDIDAS DE RADÔNIO *INDOOR* NOS POSTOS DE TRABALHO



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica e Informática Industrial

Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 –  
Curitiba – PR Brasil



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
E INFORMÁTICA INDUSTRIAL

Ofício nº 04/10/2016

Curitiba, 04 de outubro de 2016.

À Empresa X

Referência: Medidas da Concentração de Radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) na Unidade Y Edifício Tal

### *PARECER (Modelo)*

#### **1. Introdução**

Com o objetivo de pesquisa, o Grupo do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR realizou X medidas da Concentração de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) nas dependências da Unidade Y da Empresa X, edifício Tal, em Curitiba, capital do Paraná. Portanto, este parecer técnico tem como fim apresentar algumas considerações relevantes sobre os resultados encontrados.

#### **2. Análise da Coleta de Dados**

Vimos por meio desta, primeiramente, apresentar os agradecimentos pelo apoio e oportunidade de realizar nossa pesquisa sobre o gás radônio em ambientes. Os dados obtidos em sua Empresa contribuíram muito para nossos estudos e, conseqüentemente, para a compreensão das concentrações de radônio na região de Curitiba.

Comunicamos que, segundo os limites estabelecidos pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Ionizantes - UNSCEAR a concentração de gás radônio no interior de ambientes entre 0-200 Bq/m<sup>3</sup> é considerada normal, de 200-400 Bq/m<sup>3</sup> é tida como nível de atenção, de 400-600 Bq/m<sup>3</sup> sugere-se uma monitoração continuada com ações

mitigadoras e que acima do valor de  $600 \text{ Bq/m}^3$  recomenda-se intervenção para ação mitigadora. Já, segundo as orientações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica - ICRP, a concentração de gás radônio no interior de ambientes inferior a  $300 \text{ Bq/m}^3$  é considerada normal.

As medidas obtidas pelos Z detectores instalados em sua Empresa por um período aproximado de 90 dias apresentaram concentrações de radônio de  $\text{XXX Bq/m}^3$  e  $\text{XXX Bq/m}^3$ . Consideramos que os valores obtidos estão dentro da normalidade, segundo os órgãos internacionais mencionados acima, e que não há recomendações quanto a possíveis ações mitigadoras a serem adotadas.

Agradecemos pela atenção.

Grupo de Pesquisa sobre radiações ionizantes da UTFPR

---