

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO TRABALHO**

GUSTAVO MACIOSKI

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM
MARMORARIAS DE CURITIBA-PR**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

GUSTAVO MACIOSKI

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM
MARMORARIAS DE CURITIBA-PR**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Segurança do Trabalho, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Higiene e Segurança do Trabalho.

Orientadora: Profa. Dra. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2015

GUSTAVO MACIOSKI

AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO EM MARMORARIAS DE CURITIBA-PR

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientadora:

Profa. Dra. Janine Nicolosi Correa
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba.

Banca:

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba.

Prof. Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba.

Prof. M.Eng. Massayuki Mário Hara
Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Campus Curitiba.

CURITIBA
2015

“O termo de aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Nicolle pelo carinho, amor e compreensão durante todos os anos em que estamos juntos.

À minha família por todo o apoio que tive ao longo de minha vida e por todo incentivo que recebi.

À Professora Janine Nicolosi Corrêa pela dedicação na orientação deste trabalho e auxílio durante a condução dos experimentos.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo suporte através de uma bolsa integral para a realização do curso de especialização.

Ao CPGEI pela disponibilidade de materiais para a realização dos experimentos, bem como no auxílio das análises.

Às empresas que aceitaram fazer parte deste estudo, pelo suporte prestado.

RESUMO

MACIOSKI, Gustavo. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em marmorarias em Curitiba-PR**. 2015. 44 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O radônio é um gás radioativo que emana de rochas e solos e tende a concentrar-se em espaços fechados como minas subterrâneas ou casas. Quando o gás radônio é inalado, as partículas alfa emitidas por decaimento radioativo podem interagir com o tecido nos pulmões e aumentam a chance de câncer naquele órgão. Através do corte, polimento e armazenamento de peças de origem rochosa, as marmorarias podem estar expondo seus trabalhadores à este risco, uma vez que os materiais sempre possuem traços de minerais radioativos. O NCRP, por exemplo, considera como normal as concentrações de radônio em ambientes internos em até 200 Bq/m³. O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de concentração de radônio ²²²Rn em marmorarias na região de Curitiba-PR. As medidas da concentração do gás Radônio foram realizadas em 7 empresas avaliando-se diferentes ambientes de trabalho. O levantamento foi efetuado por meio de detectores do estado sólido CR-39 e a partir dos resultados, observou-se que as concentrações mostraram-se dentro da normalidade. Observou-se que a maioria dos valores ficou abaixo de 100 Bq/m³ e apenas um caso isolado ficou entre 200 e 400 Bq/m³, que poderia indicar a necessidade de ações mitigadoras. Levantamentos como este são fundamentais para garantir a segurança dos trabalhadores expostos à radiação natural e servem como uma contribuição para dados sobre o radônio no Brasil.

Palavras-chave: Radônio, Radiação ionizante, Segurança do Trabalho, Marmoraria.

ABSTRACT

MACIOSKI, Gustavo. **Evaluation of radon concentration levels in marble stores in Curitiba-PR. 2015.** 44 f. Monograph (Specialization in Occupational Safety Engineering) – Academic Department of Civil Construction, Federal Technology University of Paraná. Curitiba, 2015.

Radon is a radioactive gas that emanates from rocks and soils and tends to concentrate in enclosed spaces such as underground mines and homes. When radon gas is inhaled, alpha particles emitted by decay can interact with the tissue in the lungs and increase the chance of cancer in that organ. By cutting, polishing and storage parts of rocks, marble factory may be exposing their workers to this risk, once every material always present traces of radioactive minerals. The NCRP, for example, consider as normal indoor concentrations of radon until 200 Bq/m³. The aim of this study is to evaluate radon concentration levels of ²²²Rn in marble shops in Curitiba-PR region. Measures of radon gas concentration were held in seven companies evaluating different working environments. The study used solid-state detectors CR-39 and from the results, it was observed that the concentrations were within the normal range. It was observed that most values were below 100 Bq/m³ and only one isolated case was between 200 and 400 Bq/m³, which could indicate the need of mitigating actions. Studies like this are important to ensuring the safety of workers exposed to natural radiation and serve as a contribution to data on radon in Brazil.

Keywords: Radon, Ionizing radiation, Occupational Safety Engineering, Marble.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais elementos das séries radioativas	13
Figura 2 - Contribuição para a dose média anual.....	14
Figura 3 - Etapas produtivas da indústria de mineração	16
Figura 4 - Indústria das rochas (processos e produtos)	16
Figura 5 - Participação das substâncias na produção mineral da RMC	17
Figura 6 - Localização das empresas do setor de rochas ornamentais da RMC	17
Figura 7 - Presença de tório em amostra de pedra decorativa.....	20
Figura 8 - Concentrações de radônio em ambientes com pedras decorativas.....	20
Figura 9 - Registros de acidente de trabalho na área de produção de granito.....	21
Figura 10 - Neoplasia registrada como acidente de trabalho	22
Figura 11 - Câmara de difusão e detector CR-39.....	27
Figura 12 - Câmaras com detectores CR-39 antes e após exposição	27
Figura 13 - Imagem microscópica de traços presentes no detector CR-39.....	28
Figura 14 - Histograma de frequências das medidas de concentração.....	33
Figura 15 - Comparação entre distribuições	34
Figura 16 - Concentração de radônio por empresa.....	34
Figura 17 - Concentração de radônio por ambiente	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de difusão do radônio em diferentes meios	18
Tabela 2 - Concentração de urânio-238 e tório-232 em rochas e solos	19
Tabela 3 - Aumento do risco de câncer de pulmão	23
Tabela 4 - Aparelhos para medição de gás radônio e suas características	24
Tabela 5 - Medidas de controle do radônio	25
Tabela 6 - Postos de trabalho analisados e suas atividades.....	26
Tabela 7 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido	29
Tabela 8 - Valores críticos para a estatística do teste de Komolgorov-Smirnov.....	30
Tabela 9 - Medidas de concentração nas marmorarias	32

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVO.....	11
1.1.1.	Objetivo Geral.....	11
1.1.2.	Objetivo Específico.....	12
1.2.	ESTRUTURA.....	12
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1.	MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS.....	15
2.2.	RADÔNIO.....	18
2.3.	SEGURANÇA DO TRABALHO EM MARMORARIAS.....	21
2.4.	EFEITOS DA RADIAÇÃO.....	23
2.1.	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO.....	23
2.2.	MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO.....	24
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1.	AMBIENTES ANALISADOS.....	26
3.2.	MEDIDA DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO.....	27
3.3.	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	29
4.	RESULTADOS	32
4.1.	CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO.....	32
4.2.	CONCENTRAÇÃO POR GRUPOS DE INTERESSE.....	34
4.3.	AÇÕES MITIGADORAS EM MARMORARIAS.....	36
5.	CONCLUSÕES	38
	REFERÊNCIAS.....	39
	APÊNDICE A – Dados coletados.....	42

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a World Health Organization (2009), o radônio é reconhecido por representar metade de toda radiação absorvida por um ser humano. Ao ser inalado, o radônio passa a ser um causador potencial do câncer de pulmão (UNSCEAR, 2000). Assim, dentre seus isótopos, o radônio ^{222}Rn é o mais estudado por apresentar uma meia vida de 3,8 dias e ser capaz de percorrer grandes distâncias entre a fonte de emissão e o aparelho respiratório humano.

O NCRP (1985) limita as concentrações em ambientes internos da seguinte forma: normal até 200 Bq/m³, atenção de 200 a 400 Bq/m³, remediação de 400 a 600 Bq/m³, e intervenção acima de 600 Bq/m³. A EPA (2000) sugere prática de intervenção em residência com valores de concentração acima de 148 Bq/m³.

Diversos autores e documentos de agências internacionais indicam que as maiores concentrações de radônio se encontram no solo, águas subterrâneas e principalmente em rochas (SMITH e COTHERN, 1987; WILKENING, 1990; WHO, 2009). Deste modo, estudos da concentração de radônio em locais que trabalham com pedras decorativas (granitos, basaltos e mármore) se faz necessária para avaliar a exposição de trabalhadores à esta radiação, uma vez que, para UNSCEAR (2000), esta exposição está diretamente relacionada à incidência de câncer.

Para Tavares *et al.* (2000), sendo as rochas ornamentais amplamente utilizadas como materiais de construção, tanto estruturais como de revestimento, elas podem tornar-se uma importante fonte de dose¹ se as concentrações de radioatividade forem altas e dependendo da forma e quantidade com que são aplicadas.

Neste sentido, Anjos *et al.* (2011) afirmam que o uso generalizado de rochas de granito tem causado uma considerável preocupação pública sobre a exposição à radiação natural, uma vez que é bem conhecido que elementos que emitem radiação estão presentes em quantidades significativas nas rochas ígneas, tais como o granito.

Novos mecanismos de regulamentação comercial, que algumas vezes sugerem iniciativas de barreiras não-tarifárias, têm sido estabelecidos e afetam o setor. Um deles é o denominado NORM – Natural Occurrence of Radioactive Materials, caracterizado quando existe manifestação ou ocorrência de radioatividade em

¹ A unidade básica utilizada para expressar a exposição à radiação de um material, tal como o corpo humano, é a dose absorvida, para qual a unidade é o gray (Gy) (UNSCEAR, 2000).

materiais naturais ou artificiais, ao qual o setor de rochas está sujeito, por exemplo, pela emissão de gás radônio em rochas graníticas no mercado dos EUA (CHIODI FILHO e RODRIGUES, 2009).

Também está sendo definida uma nova legislação de controle de substâncias químicas exportadas para a União Européia, a qual se denomina REACH – Register Evaluation and Authorization of Chemicals. Esta legislação estabelece que todas as substâncias químicas exportadas para a União Européia, comercializadas como tal ou como componentes de preparações e de artigos, devem se enquadrar nas suas regras (IBRAM, 2008). Esta legislação aplica-se ao setor de rochas ornamentais, quando seus produtos são tratados com resinas (principalmente de polimento) e hidro-óleo-repelentes, ou quando se utilizam embalagens plásticas ou de madeira tratada.

Destaca-se ainda que muitas rochas e placas provenientes de minerais, por exemplo, são exportadas como material de construção e ao entrar nos outros países – por falta de controle do produto – o mesmo passa a ser classificadas como material radioativo pela alta concentração de minerais que emitem radiação natural.

Alguns estudos já foram conduzidos na área da mineração e na avaliação de solos e rochas (MAROCCHI *et al.*, 2011; SMITH e COTHERN, 1987; WILKENING, 1990 e WHO, 2009). Contudo não foi encontrado trabalho técnico apresentando levantamento da concentração de radônio em marmorarias, uma vez que é possível que a maior emissão do radônio aconteça durante as operações de corte e polimento das peças de mármore e granito durante os primeiros dias nas marmorarias. Assim, é necessário um estudo seja capaz de avaliar estas concentrações e verificar se os trabalhadores estão expostos à concentrações acima dos limites sugeridos por órgãos internacionais.

1.1. OBJETIVO

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar os níveis de concentração de radônio ^{222}Rn em marmorarias na região de Curitiba, no estado do Paraná.

1.1.2. Objetivo Específico

O estudo das concentrações de radônio foi realizado em diferentes etapas:

- Realizar um levantamento de concentração de radônio em marmorarias;
- Verificar se há correlação entre o local de trabalho e as concentrações de radônio;
- Propor soluções para mitigação com relação aos níveis de concentração de radônio nos postos de trabalho de marmorarias;

1.2. ESTRUTURA

No capítulo 1 será apresentado um panorama geral sobre os acidentes de trabalho e sua relação com radiações ionizantes, além de descrever os objetivos, a necessidade e contribuição desta pesquisa.

No capítulo 2 será descrita a fundamentação teórica sobre radiações ionizantes na segurança do trabalho, peculiaridades do Radônio, bem como os principais métodos para avaliação de sua concentração em ambientes.

No capítulo 3 será mostrado qual foi a metodologia adotada para a realização dos ensaios e as limitações do levantamento.

No capítulo 4 serão apresentadas as discussões e análises feitas sobre os resultados obtidos, bem como medidas de mitigação.

Por fim, no capítulo 5 serão apresentadas as conclusões sobre as análises feitas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Parte dos materiais existentes na natureza são constituídos de átomos ou suas combinações. Sabe-se que núcleo muito energético, por ter excesso de partículas ou de carga, tende a estabilizar-se, emitindo algumas partículas (CARDOSO, 2011). Estes elementos radioativos realizam transmutações ou “desintegrações” sucessivas, até que o núcleo atinja uma configuração estável (OKUNO e YOSHIMURA, 2010).

Em cada decaimento, os núcleos emitem radiações dos tipos alfa, beta e/ou gama e cada um deles é mais “organizado” que o núcleo anterior. Essas sequências de núcleos são denominadas séries radioativas ou famílias radioativas naturais e são apresentadas na Figura 1.

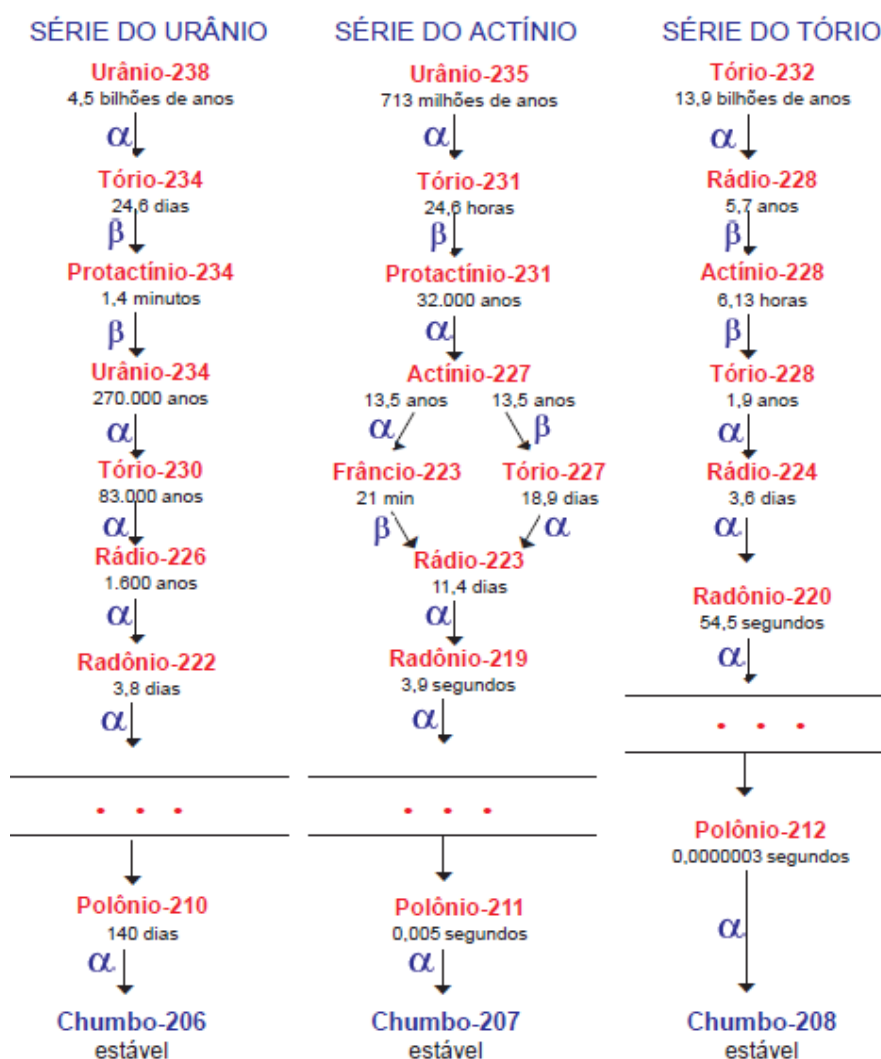


Figura 1 - Principais elementos das séries radioativas

Fonte: Cardoso (2011)

A partir dos dados apresentados na Figura 1, é possível observar que em busca da estabilidade atômica os elementos $^{238}\text{Urânio}$, $^{235}\text{Urânio}$ e $^{232}\text{Tório}$ se transformam em isótopos do radônio (elemento gasoso) durante a emissão de partículas para estabilização na forma de chumbo.

Ao ser inalado, o radônio passa a ser um causador potencial do câncer de pulmão (UNSCEAR, 2000). Assim, dentre seus isótopos, o radônio ^{222}Rn é o mais estudado por apresentar uma meia vida de 3,8 dias e ser capaz de percorrer grandes distâncias entre a fonte de emissão e o aparelho respiratório humano.

De acordo com a World Health Organization (2009), a emissão do radônio é reconhecida como a mais importante fonte de radônio indoor², conforme apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

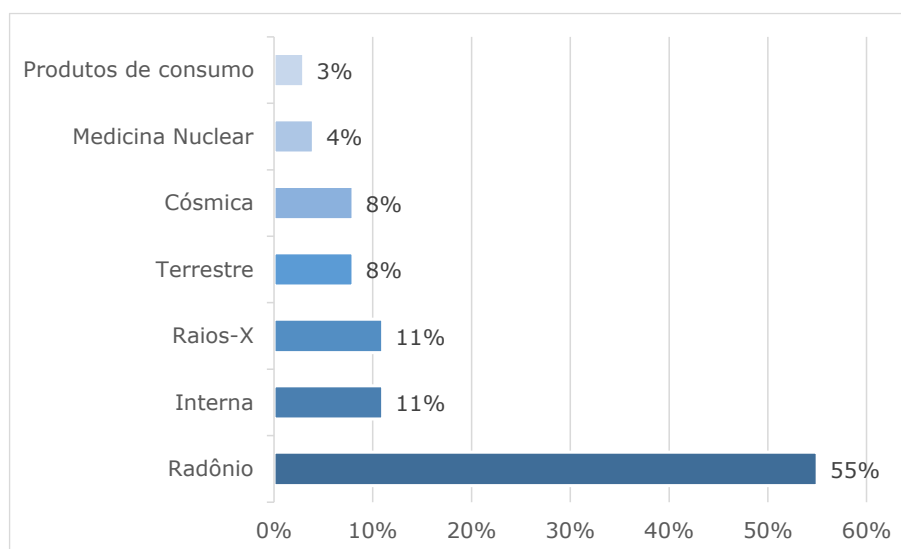


Figura 2 - Contribuição para a dose média anual
Fonte: UNSCEAR (2000)

Os dados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostram que, em média, metade de toda radiação absorvida por um ser humano, incluindo as naturais e artificiais, é devida ao radônio. A maior fonte do gás é o solo e rochas, e outras fontes, incluem materiais de construção e de água extrauído a partir de poços, também são fontes de menor intensidade.

Diversos estudos já avaliaram a concentração do gás radônio na região de Curitiba. Em seus estudos, Corrêa (2011) avaliou os níveis de concentração de

² O termo radônio indoor é utilizado na literatura para designar o radônio presente em ambientes fechados (como residências e ambientes de trabalho). Medidas do gás realizadas em ambientes abertos é nomeada pelos autores como radônio ambiental.

radônio ^{222}Rn em residências, postos de trabalho e águas de poços na região metropolitana de Curitiba. Em seus resultados, observou-se que nas residências a maioria dos valores de concentração do gás ficou abaixo de 100 Bq/m^3 e apenas um caso isolado ficou entre 200 e 400 Bq/m^3 , nos postos de trabalho as concentrações indoor permaneceram abaixo de 100 Bq/m^3 e 70% águas apresentaram resultados superiores a $11,1 \text{ Bq/L}$.

Del Claro (2013), por sua vez, também avaliou os níveis de concentração do gás radônio no ar em postos de trabalho na região de Curitiba. Em seus estudos os resultados das concentrações variaram de 36 a 164 Bq/m^3 , mostraram-se dentro da normalidade já que nenhum valor encontrado ultrapassou o limite de 200 Bq/m^3 . As concentrações de radônio no solo apresentaram valores que variaram de 31 a 35 kBq/m^3 , níveis que não caracterizam uma situação de risco por estarem abaixo do limite referencial de 50 kBq/m^3 .

Fior (2008) estudou a variação da concentração de ^{222}Rn no decorrer da construção de ambientes (células-teste), com bloco cerâmico e de concreto e com a aplicação de materiais como reboco, calfino e tinta, originados da região metropolitana de Curitiba. Após a aplicação de tinta a óleo e tinta acrílica fosca, tais concentrações diminuíram. Os resultados evidenciam que o revestimento interno das paredes atuou diminuindo a exalação do radônio no interior das células-teste.

2.1. MERCADO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais, de acordo com Carvalho (2007), podem ser definidas como a matéria-prima de origem mineral utilizada como material de construção com funções essencialmente decorativas. O setor de rochas ornamentais tem características inerentes a uma indústria tradicional. Trata-se de uma atividade extrativa cujos traços mais marcantes são: o processamento de recursos naturais; a baixa intensidade tecnológica; a reduzida exigência em termos de escala mínima de produção; o caráter exógeno da inovação tecnológica, pois ela costuma vir incorporada nos equipamentos; e o fato da capacidade empreendedora do dirigente ser um fator crítico para a competitividade (SPÍNOLA *et al.*, 2004). A Figura 3 apresenta as principais etapas da indústria de rochas.



Figura 3 - Etapas produtivas da indústria de mineração
Fonte: Adaptado de Spínola *et al.* (2004)

É possível observar que possivelmente a maior emissão de gás radônio ocorre nas primeiras etapas de extração da matéria prima ou ainda durante o corte das placas (desdobramento). Como nas etapas produtivas, são diversos os produtos desenvolvidos pela mineração e produção de rochas, e são diversas as áreas de aplicação da indústria de rochas, conforme apresentado por Villaschi Filho e Pinto (2000) na Figura 4.

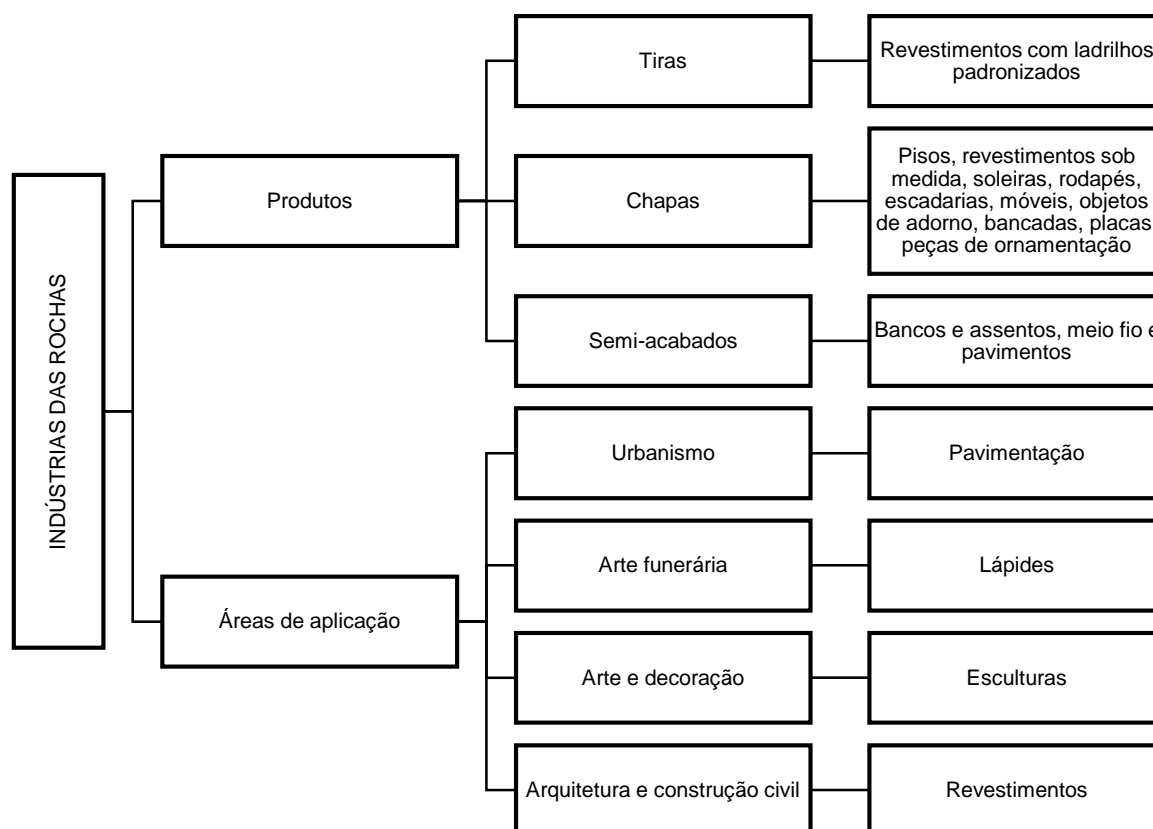


Figura 4 - Indústria das rochas (processos e produtos)
Fonte: Adaptado de Filho e Pinto (2000)

Segundo últimos dados levantados dados pela MINEROPAR (2003), a participação média anual da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) na produção mineral paranaense no período de 1995 a 2000 ficou em 57% do valor da produção (R\$ 75 milhões) do total do estado. A figura Figura 5 apresenta a participação das substâncias na produção mineral da RMC.

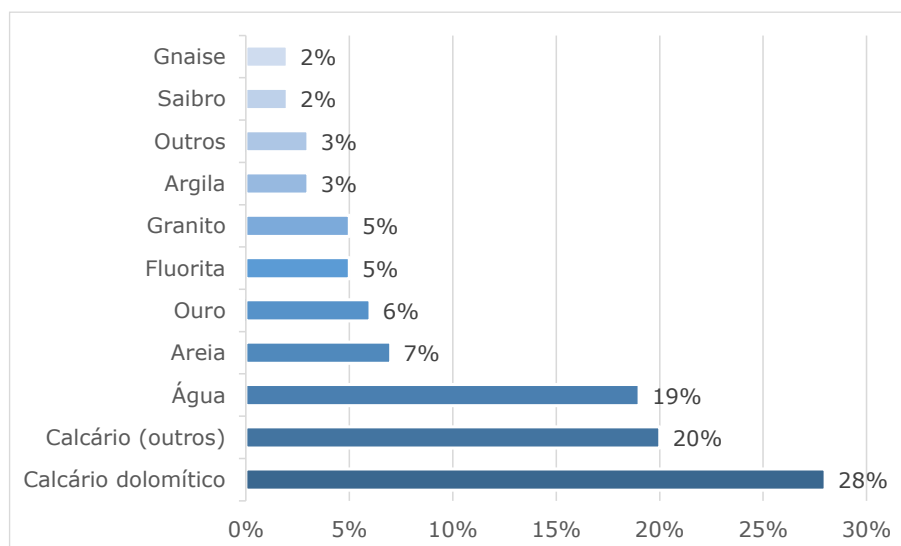


Figura 5 - Participação das substâncias na produção mineral da RMC
Fonte: MINEROPAR (2003)

Já a Figura 6 apresenta a localização das empresas do setor de rochas ornamentais da Região Metropolitana de Curitiba, no Paraná.

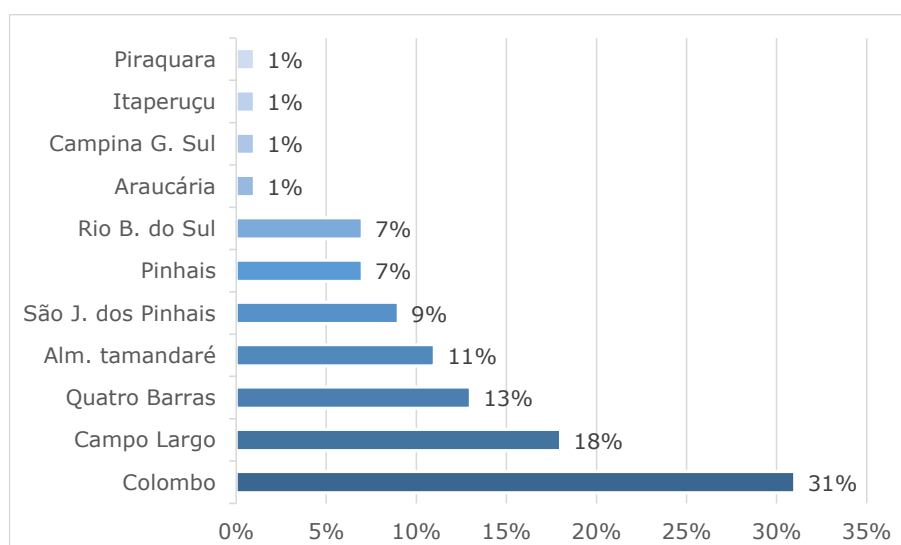


Figura 6 - Localização das empresas do setor de rochas ornamentais da RMC
Fonte: MINEROPAR (2003)

Ferreira (2013) afirma que devido à grande variedade de minerais extraídos na RMC, eles são agrupados de acordo com substância/usos, onde a denominação comercial Granitos refere-se aos minerais agrupados (granitos, gnaisses, migmatitos e sienitos), cujos principais usos são britas, rochas ornamentais e pedras de cantaria.

2.2. RADÔNIO

O radônio foi identificado pela primeira vez como uma substância única em 1900, quatro anos após a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel em Paris, em 1896 (WILKENING, 1990). Em comparação com os outros gases nobres, radônio é o mais pesado e tem o mais alto ponto de fusão e de ebulição (SMITH e COTHERN, 1987).

Portanto, o Radônio (^{222}Rn) é um gás nobre formado a partir de rádio (^{226}Ra), que é um produto de decaimento do urânio (^{238}U), segundo a World Health Organization (2009). Este elemento tem uma meia-vida³ de 3,8 dias, emana principalmente de rochas e solos e tende a concentrar-se em espaços fechados como minas subterrâneas ou casas. Ele um dos principais contribuintes para a dose de radiação ionizante recebida pela população geral.

O gás, com a sua meia-vida de alguns dias, pode se mover de forma independente ao longo grandes distâncias e manter uma concentração significativa na atmosfera (NCRP, 1985). As distâncias alcançadas pelo gás radônio em diferentes meios é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de difusão do radônio em diferentes meios

Meio	Coeficiente de difusão (cm ² /s)	Alcance (m)
Ar	10 ⁻²	2,4
Água	10 ⁻⁵	
Areia	3. 10 ⁻²	1,5
Argilas	8. 10 ⁻⁵	
Concreto	2. 10 ⁻⁵	0,04- 0,26

Fonte: Smith; Cothorn (1987)

A unidade do Sistema Internacional (SI) da atividade de radiação é chamado o becquerel e o símbolo da unidade é Bq (uma desintegração por segundo). A

³ A meia-vida de uma substância radioativa é definida, de acordo com Wilkening (1990), como o tempo necessário para um número original de átomos se reduzir à metade desse número

radiação pode ser expressa em termos de concentração de atividade (Bq/m^3) e de concentração em um material (Bq/kg), conforme apresentado na Tabela 2 (CARDOSO, 2011).

Tabela 2 - Concentração de urânio-238 e tório-232 em rochas e solos

Tipo de rocha	Material	^{238}U Bq/kg	^{232}Th Bq/kg
Ígnea	Basalto	7 – 10	15 – 15
	Granito	40	70
Sedimentar	Arenito	40	50
	Calcita/Dolomito	25	8
Solos		66	37

Fonte: NCRP (1985) apud Wilkening (1990)

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 é possível observar a elevada emissão radiação principalmente de rochas. Elementos como o urânio e o tório irão se transformar em isótopos do radônio. Estes, distribuídos no solo e rochas da crosta terrestre, podem liberar gás para os capilares e poros de forma a atingir níveis da ordem de 1000 vezes maior do que o ar exterior normal (WILKENING, 1990). Segundo o mesmo autor, materiais de construção refletem concentrações de suas fontes da crosta terrestre podendo atingir 70 Bq/kg em concretos e tijolos.

Quando o gás radônio é inalado, as partículas alfa - emitidas por produtos de decaimento de radônio (^{218}Po e ^{214}Po) - podem interagir com o tecido biológico nos pulmões que conduzem a danos na estrutura genética das células.

Assim, é de grande importância o levantamento das quantidades de radiação emitidas por minerais, em especial, pedras decorativas; bem como elaborar estimativas da emissão de radônio em ambientes devido à estas radiações (AHN e LEE, 2005; ANJOS *et al.*, 2011 e MAROCCHI *et al.*, 2011)

Ahn e Lee (2005) realizaram um estudo medindo a emissão de radônio em vinte amostras de materiais de construção naturais comumente empregados como pedras ornamentais no mercado internacional que têm sido investigados por radioatividade natural. Seus resultados apontaram que a maioria dos materiais não excedem o limite de emissão indicada pela Comissão Europeia quando utilizados como material ornamental, de pavimentação ou de revestimento. Contudo, Marocchi *et al.* (2011) destacam em seu estudo que sempre existe a presença de elementos radioativos em pedras decorativas em diferentes teores dependendo de seus minerais. A Figura 7 apresenta destacada, em uma amostra de zircônia, o elemento

tório após realização de microscopia eletrônica de varredura com caracterização mineral por EDS (Energy Dispersive Spectroscopy).

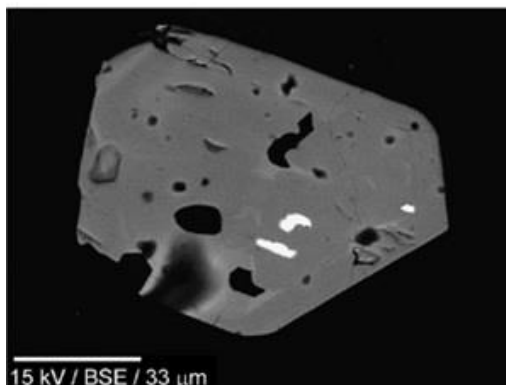


Figura 7 - Presença de tório em amostra de pedra decorativa
Fonte: Marocchi *et al.* (2011)

A Figura 7 destaca o elemento tório em pequena quantidade dentro de uma lâmina de rocha, de forma isolada e semelhante a um poro. Anjos *et al.* (2011), por sua vez, avaliaram a concentração de radônio em uma sala de (5,0 x 4,0 x 2,8) m com baixa ventilação (0,1 renovação de ar por hora) revestida com diferentes granitos nas paredes e piso. A Figura 8 apresenta as concentrações de radônio encontradas a partir de diferentes rochas.

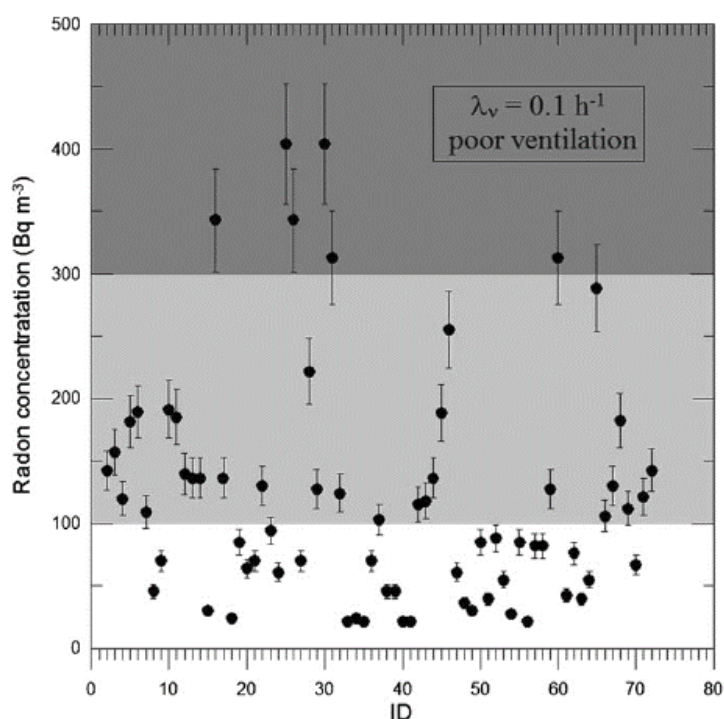


Figura 8 - Concentrações de radônio em ambientes com pedras decorativas
Fonte: Anjos *et al.* (2011)

Com os resultados apresentados na Figura 8 os autores concluíram que em um ambiente mal ventilado, 49% dos granitos brasileiros apresentam concentrações de radônio inferiores a 100 Bq/m³, 42% irá apresentar valores entre 100 e 300 Bq/m³, e apenas 9% irá apresentar valores acima de 300 Bq/m³. Assim, mesmo rochas com baixa emissão, conforme verificado por Ahn e Lee (2005), pode causar altas concentrações de radônio em um local com baixa ventilação.

2.3. SEGURANÇA DO TRABALHO EM MARMORARIAS

Os estudos e levantamento de riscos em marmorarias se concentram basicamente em medidas de luminância, temperatura, ergonomia e principalmente ruído e qualidade do ar (TAVARES *et al.*, 2000; SANTOS *et al.*, 2007; MACHADO *et al.*, 2012).

Segundo dados do Ministério da Previdência Social a quantidade de acidentes do trabalho, por situação do registro, segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), no estado do Paraná entre 1999 e 2012 são apresentados na Figura 9. Os dados dos anos de 2013 a 2015 não foram divulgados ainda.

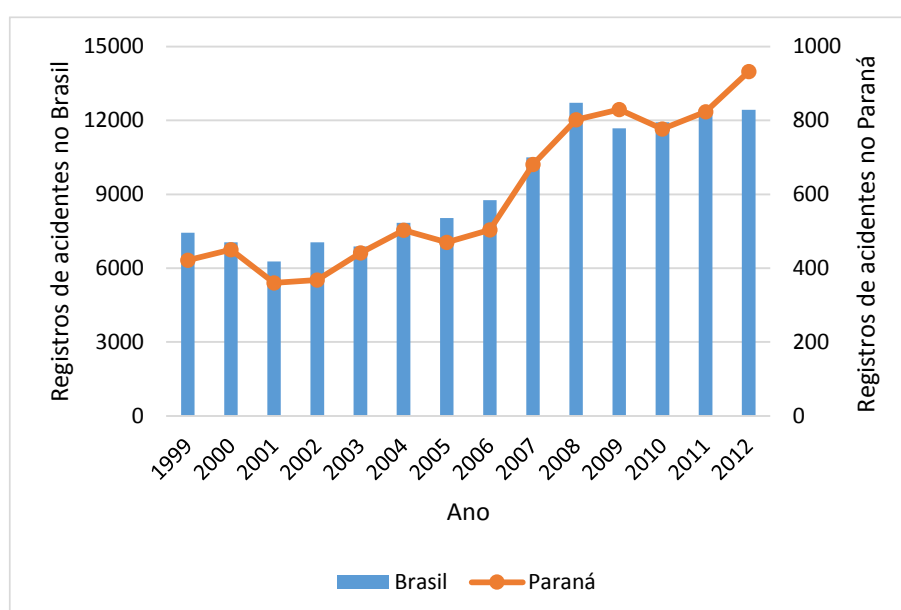


Figura 9 - Registros de acidente de trabalho na área de produção de granito
Fonte: Brasil (2015)

Os dados da Figura 9 referem-se aos acidentes com e sem CAT⁴, registrados na fabricação de produtos de minerais não-metálicos que incluem a aparelhamento de placas e execução de trabalhos em mármore, granito, ardósia e outras pedras. A partir dos dados é possível observar um aumento dos registros de acidente e que o estado do Paraná possui uma baixa contribuição para os valores totais. Cabe ainda destacar que a maior parte dos acidentes de trabalho neste setor estão relacionados a agentes físicos.

Ainda segundo dados do Ministério da Previdência Social, a Figura 10 apresenta a porcentagem de incidência dos diferentes tipos de neoplasias (tumores) malignas registrados como acidente de trabalho entre os anos de 1999 e 2012 no Brasil.

Registros de acidente relacionados à incidência de câncer de pulmão seria o único indicador possível para avaliar a influência do radônio, uma vez que este seria o principal sintoma nos trabalhadores da área de mineração, contudo, a previdência social não disponibiliza registros de neoplasia relacionados às atividades econômicas.

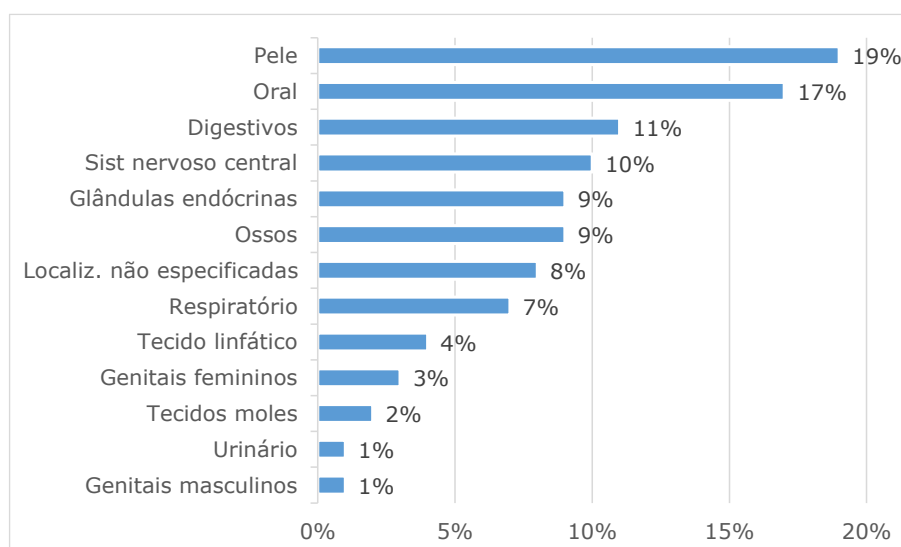


Figura 10 - Neoplasia registrada como acidente de trabalho
Fonte: Brasil (2015)

⁴ Comunicação de Acidente de Trabalho

2.4. EFEITOS DA RADIAÇÃO

De acordo com a World Health Organization (2009), as estimativas atuais da proporção de câncer no pulmão atribuíveis ao radônio pode atingir até 14% do total dos casos registrados, dependendo da média concentração de radônio no país e dos métodos de cálculo utilizados, colocando o gás como a segunda causa de câncer de pulmão na população em geral, depois de fumar.

De acordo com NCRP (1985), já foram realizados estudos verificando as concentrações nos ambientes e a incidência de tumores, bem como a eficácia de ações mitigadores em problemas de saúde considerando diferentes concentrações de radônio na atmosfera, em minas e em águas subterrâneas, além de experimentos com animais.

Não há limiar de concentração abaixo do qual a exposição ao radônio não apresente riscos. Mesmo baixas concentrações de radônio podem resultar em um pequeno aumento no risco de câncer do pulmão (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009). A Tabela 3 apresenta a percentagem do aumento do risco de câncer de pulmão por aumento na concentração de radônio em 100 Bq/m³.

Tabela 3 - Aumento do risco de câncer de pulmão

Estudo	Aumento do risco de câncer de pulmão por aumento na concentração de radônio em 100 Bq/m ³ (%)
Europeu (2005 - 2006)	8%
Norte americano (2005 - 2006)	11%
Chinês (2004)	13%

Fonte: World Health Organization (2009)

2.1. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO

A World Health Organization (2009) afirma que medições de radônio em casas são fáceis de executar, mas precisa ser baseada em protocolos normalizados para assegurar medições consistentes. O tipo de detector deve ser cuidadosamente selecionado, uma vez que influencia o custo da medição e pode inviabilizar um levantamento a nível nacional.

A concentração de radônio varia com o tipo de construção e com os hábitos de ventilação. Devido a estas flutuações, estimar a concentração média anual de

radônio no ar exige medições confiáveis durante pelo menos três meses, e preferivelmente mais tempo (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009). A Tabela 4 apresenta os principais aparelhos para medição de gás radônio e suas características.

Tabela 4 - Aparelhos para medição de gás radônio e suas características

Detector	Ativo/Passivo	Incerteza (%)	Período de amostragem	Custo
Detectores Alpha-track (ATD)	Passivo	10 – 25	1 – 12 meses	Baixo
Detector de carvão ativado (ACD)	Passivo	10 – 30	2 – 7 dias	Baixo
Câmara iônica de eletreto (EIC)	Passivo	8 – 15	5 dias – 1 ano	Médio
Aparato de integração eletrônica (EID)	Ativo	< 25	2 dias - anos	Médio
Monitor contínuo de radônio (CRM)	Ativo	< 10	1 hora – anos	Alto

Fonte: World Health Organization (2009)

Os detectores tipo alfa-track (ATD), citados na Tabela 4, de acordo com a World Health Organization (2009), consiste em uma câmara de difusão plástica coberto por um filtro com um detector em seu interior. Quando as partículas alfa atingem o material, produz-se áreas de danos microscópicas, observáveis por microscopia de luz. Estas marcas podem ser contadas manualmente ou por um dispositivo de contagem automatizada. Um fator de conversão obtido por exposições controladas permite a conversão de densidade de marcas para concentração de radônio. Este tipo de medidor será utilizado neste trabalho.

2.2. MÉTODOS PARA REDUÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO

Estratégias tanto para a prevenção de radônio (novas habitações) e mitigação (habitações existentes) são necessários para atingir uma redução global do risco. Sendo que as fontes de radônio, as concentrações de radônio e mecanismos de transporte de radônio vão influenciar a escolha de estratégias de prevenção e mitigação (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009).

Para NCRP (1985), a ventilação pode reduzir a concentração de radônio eficazmente para níveis semelhantes ao ar livre com cerca de quatro renovações de ar por hora. Como esta alta taxa de ventilação raramente é atingido, os níveis em um ambiente fechado são geralmente consideravelmente e mais elevados do que os níveis ao ar livre e contribuem de forma significativa para a dose de uma população.

Ainda de acordo com a World Health Organization (2009), medições de radônio devem sempre ser feitas para determinar a eficácia de qualquer prevenção ou esforço de mitigação, sendo fundamental treinar profissionais para efetuar este controle e estabelecer orientações e normas a nível nacional. A Tabela 5 apresenta algumas medidas de controle do gás radônio em novas construções, sendo que todas necessitam acompanhamento a longo prazo e também a aplicação de algumas ações mitigadoras.

Tabela 5 - Medidas de controle do radônio

Opção	Redução	Performance a longo prazo	Descrição	Custo de instalação	Custo de operação
Impermeabilização do solo	Nenhuma para baixa	Baixa	Muito boa	Moderado	Muito baixo
Barreira de gás no solo	Variável	Estável mas limitada	Muito boa	Variável	Nenhuma
Ventilação passiva	Moderada a boa	Muito boa	Muito boa	Baixa	Baixa
Ventilação ativa	Boa	Muito boa	Boa	Moderada	Moderada
Pressurização ativa do solo	Moderada a boa	Muito boa	Muito boa	Baixa	Muito baixa
Pressurização passiva do solo	Baixa a moderada	Boa	Muito boa	Baixa	Muito baixa
Ventilação balanceada	Baixa a moderada	Boa	Muito boa	Baixa a alto	Moderado a alto

Fonte: USEPA (1993)

A relação custo benefício das medidas preventivas da redução da concentração média de radônio em uma área pode ser utilizada como uma ferramenta útil para a avaliação dessas políticas e pode levar a novos e mais eficientes métodos de redução deste risco (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2009). A Tabela 5 apresenta uma alteração na qualidade de vida de uma população (considerando a expectativa de vida) após introdução de um novo programa de controle de radônio.

A World Health Organization (2009) afirma que a tomada de ações mitigadoras que apresentem resultados é possível apenas com o controle a nível nacional das concentrações de radônio, necessitando, portanto, a participação de várias agências e órgãos. Uma agência deve liderar a implementação, coordenação e garantir programas de promoção da saúde.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados e os métodos de ensaios que foram adotados para o levantamento das concentrações de radônio nos postos de trabalho.

3.1. AMBIENTES ANALISADOS

As medidas de concentração de radônio foram restritas à sete marmorarias da região de Curitiba, através da avaliação de diferentes ambientes. A Tabela 6 apresenta os ambientes analisados e a quantidade de detectores utilizados nas medidas. Destaca-se que as indústrias presentes na região do Paraná de extração e desdobramento não permitiram o levantamento de radônio nestas etapas. Assim o foco deste estudo foi na etapa de beneficiamento do material.

Tabela 6 - Postos de trabalho analisados e suas atividades

ÁREA	DESCRIÇÃO	MEDIDORES
Corte	Área equipada com uma serra diamantada para corte de peças de mármore e granitos com uso de água corrente para redução de partículas finas no ar.	7
Acabamento	Área destinada ao polimento de peças e montagem de elementos em pedra, sem sistema de contenção de partículas finas. Uso de produtos químicos na colagem e polimento de peças.	13
Depósito	Região onde placas recém cortadas permanecem armazenadas após confecção até envio para clientes.	7
Escritório	Área destinada a administração das empresas, usualmente utilizada como showroom com peças de granito como amostras.	9
<i>Background</i>	Medidores destinados à calibração das medidas, acompanhados durante a instalação dos sensores e mantidos em ambiente controlado.	4
TOTAL		40

Fonte: Autor

É possível observar na Tabela 6 que foi realizada a instalação de 4 detectores como *background* – para correção dos traços já registrados até o início das medições.

3.2. MEDIDA DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO

A realização das medidas de radônio foram realizadas através de detectores do estado sólido SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*), colocados em câmaras de difusão.

Os detectores são compostos de uma câmara de difusão, filtro, detector CR-39 e tampa. A câmara é feita com fibra de carbono na forma de semi-esfera com 3 cm de diâmetro com uma tampa vazada para a passagem de ar. O CR-39, de acordo com Corrêa (2011) e Ferreira (2013), é um detector da família dos SSNTD, sensível à radiação alfa, e foi escolhido devido a diversos fatores que incluem sua boa sensibilidade, estabilidade e alto grau de transparência óptica. O conjunto desmontado pode ser observado na Figura 11.



Figura 11 - Câmara de difusão e detector CR-39
Fonte: Autor

Os detectores foram fixados nos diferentes ambientes afastados do piso e, sempre que possível, afastado de paredes e na altura das vias aéreas de um adulto durante o tempo de exposição de 145 dias (ou 4,8 meses). A Figura 12 apresenta um detector antes e depois da exposição.



Figura 12 - Câmaras com detectores CR-39 antes e após exposição
Fonte: Autor

Observa-se, na Figura 12, a existência de grande quantidade de pó gerada durante os processos de corte e polimento, que poderiam aumentar a emissão de radônio durante esses processos.

O processo de revelação dos traços dos detectores CR-39 foi baseado na metodologia desenvolvida por Ahn e Lee (2005) e adaptada por Corrêa (2011) para detectores CR-39 que consiste em um banho químico em solução de 6M (molar) de NaOH, a 70°C, por 14 horas.

Após revelação, foi realizada a contagem dos traços – semelhante ao observado por Corrêa (2011) na Figura 13 - em um microscópio ótico com aumento de 100 vezes, com o auxílio de um contador automático, em uma área preparada pelo fabricante de 1cm².

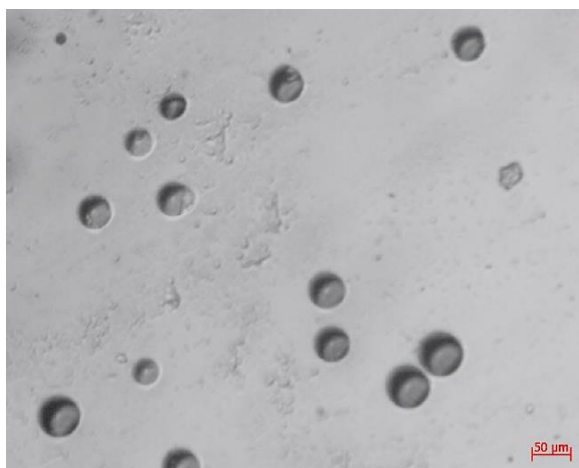


Figura 13 - Imagem microscópica de traços presentes no detector CR-39
Fonte: Corrêa (2011)

O processo de análise dos dados foi realizado com base em uma equação de calibração elaborada pelo laboratório de radiações da UTFPR com base em exposições realizadas em um ambiente controlado. O resultado desta calibração resultou na Equação 1. Antes do cálculo da concentração foram descontados os traços medidos nos detectores de background.

$$C = (405 \pm 30). n \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

C = Concentração de radônio (Bq/m³)

n = Número de traços/hora de exposição em 1cm² do detector (Bq.cm².h/m⁻³)

3.3. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Inicialmente os dados foram agrupados e foi realizada uma análise para exclusão de dados espúrios pelo critério de rejeição de Chauvenet. Neste método, em primeiro lugar, calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela 7, para assim se eliminar os pontos duvidosos. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados

Tabela 7 - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido

Número de leituras, n	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, d_{max}/σ
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Fonte: Link (2000)

Após exclusão de dados espúrios, foram realizados testes paramétricos tradicionais, baseado na distribuição t-student, que é obtido sob a hipótese de que a população tem distribuição normal. Nesse sentido, surge a necessidade de certificar se essa suposição pode ser assumida. Em alguns casos, assumir a normalidade dos dados é o primeiro passo tomado para simplificar análises. Para dar suporte a esta suposição aplicamos o teste de Kolmogorov – Smirnov.

No teste são elaboradas duas distribuições: $F_n(x)$ da Equação 2 representa a função de distribuição acumulada assumida para os dados, e $F(x)$ da Equação 3 representa a função de distribuição acumulada normal empírica dos dados, onde:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \quad \text{Equação 2}$$

$$F(x) = P(Z \leq z) \quad \text{Equação 3}$$

Como a função de distribuição empírica é descontínua e a função de distribuição hipotética é contínua, mede-se as distâncias (vertical) entre os gráficos das duas funções, teórica e empírica, nos pontos x_i e x_{i-1} . Com isso é possível utilizar como estatística de teste a Equação 4.

$$D_n = \max(\sup |F(x_i) - F_n(x_i)|, \sup |F(x_i) - F_n(x_{i-1})|) \quad \text{Equação 4}$$

Se D_n é maior que o valor crítico, rejeita-se a normalidade dos dados com em determinado intervalo de confiança, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Valores críticos para a estatística do teste de Komolgorov-Smirnov

n	Nível de Significância α			
	0,2	0,1	0,05	0,01
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,3	0,34	0,4
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,2	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,2	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
Valores maiores	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Fonte: Seward; Doane (2014)

Por fim, após comprovada a normalidade da distribuição e eliminação de dados espúrios, foram realizadas análises por intervalos de confiança para teste-t ($n < 30$).

O cálculo dos erros das médias foi realizado pelo método de propagação de erros, conforme apresentado nas equações Equação 5 a Equação 10:

$$C = A \cdot n \quad \text{Equação 5}$$

$$\sigma_C^2 = \left(\frac{\partial C}{\partial A}\right)^2 \cdot \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial n}\right)^2 \cdot \sigma_n^2 \quad \text{Equação 6}$$

$$\sigma_C^2 = n^2 \cdot \sigma_A^2 + A^2 \cdot \sigma_n^2 \quad \text{Equação 7}$$

$$\sigma_C = \sqrt{n^2 \cdot \sigma_A^2 + A^2 \cdot \sigma_n^2} \quad \text{Equação 8}$$

Como:

$$A = 305 \mp 30 \quad \text{Equação 9}$$

$$\sigma_C = \sqrt{n^2 \cdot 30^2 + 305^2 \cdot \sigma_n^2} \quad \text{Equação 10}$$

4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas diferentes medidas realizadas de concentração de radônio em marmorarias, bem como a análise da influência do ambiente e das empresas nos resultados.

4.1. CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO

Com base nos parâmetros da Equação 1 de calibração do detector, calculou-se as concentrações de ^{222}Rn nos detectores expostos nas marmorarias. A Tabela 9 apresenta as concentrações nos ambientes após descontar a densidade de traços do *background* (14 traços lidos em 1cm^2).

Tabela 9 - Medidas de concentração nas marmorarias

Empresa	Local	Densidade de traços (nº de traços / cm^2)	Tempo de exposição (dias)	Concentração (Bq/m^3)	Erro (Bq/m^3)
A	Acabamento	64	140	7,72	0,57
A	Acabamento	69	140	8,32	0,62
A	Depósito	82	140	9,89	0,73
A	Escritório	110	140	13,27	0,98
A	Corte	173	140	20,8	1,5
B	Acabamento	80	145	9,31	0,69
B	Acabamento	66	145	7,68	0,57
B	Corte	72	145	8,38	0,62
B	Depósito	119	145	13,8	1,0
B	Escritório	148	145	17,2	1,2
C	Acabamento	128	145	14,9	1,1
C	Corte	144	145	16,7	1,2
C	Escritório	161	145	18,7	1,3
C	Acabamento	175	145	20,3	1,5
C	Depósito	189	145	22,0	1,6
C	Acabamento	249	145	28,9	2,1
D	Escritório	85	140	10,24	0,76
D	Escritório	88	140	10,61	0,79
D	Acabamento	127	140	15,3	1,1
D	Depósito	134	140	16,1	1,2
D	Corte	141	140	16,9	1,2
E	Escritório	79	137	9,73	0,72
E	Depósito	118	137	14,5	1,0

E	Acabamento	173	137	21,3	1,5
E	Escritório	196	137	24,1	1,7
E	Corte	225	137	27,7	2,0
F	Depósito	97	145	11,30	0,84
F	Escritório	147	145	17,1	1,2
F	Acabamento	151	145	17,5	1,3
F	Acabamento	168	145	19,5	1,4
F	Corte	272	145	31,6	2,3
G	Escritório	73	145	8,50	0,63
G	Acabamento	158	145	18,3	1,3
G	Acabamento	163	145	18,9	1,4
G	Corte	254	145	29,5	2,1
G	Depósito	3122	145	363*	27

*Dado espúrio por critério de rejeição de Chauvenet

Fonte: Autor

A partir dos dados corrigidos da Tabela 9 foi possível elaborar um histograma com as frequências de resultados sem dados espúrios, como apresentado na Figura 14. A concentração dos ambientes foi em média de $15,5 \pm 4,6$ Bq/m³.

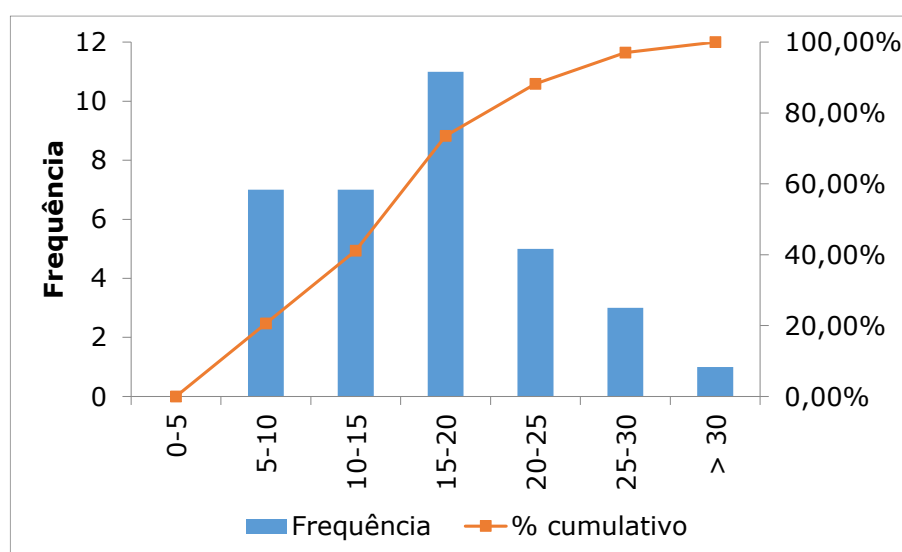


Figura 14 - Histograma de frequências das medidas de concentração
Fonte: Autor

Após realizar o teste de Komolgorov-Smirnov para normalidade, calcula-se $D_n = 0,22$ a partir dos desvios entre as distribuições e para de 95% confiança o desvio limite é igual a 0,23, conforme Tabela 8. Uma melhor visualização dos desvios pode ser observada na Figura 15.

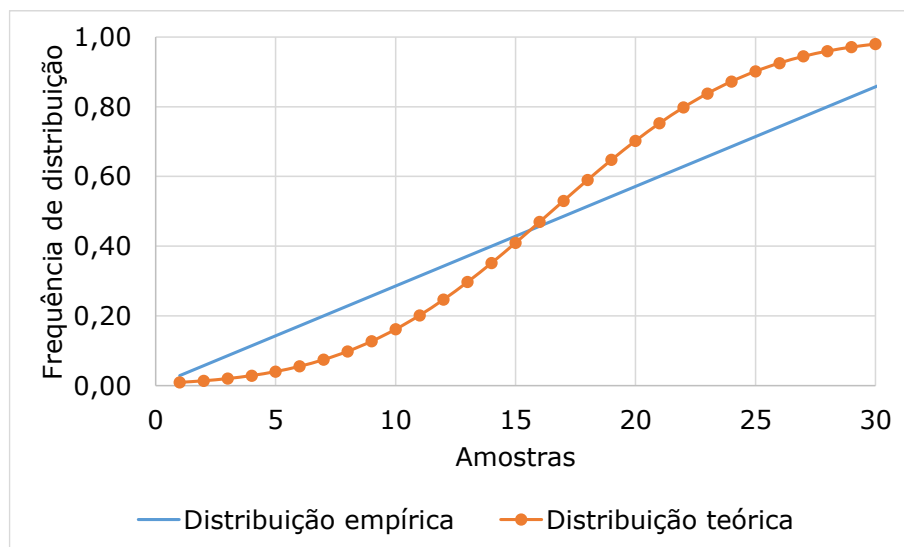


Figura 15 - Comparação entre distribuições
Fonte: Autor

Assim é possível aplicar testes paramétricos por intervalo de confiança para análise de dados, uma vez que foi verificado que os dados se comportam como distribuição normal.

4.2. CONCENTRAÇÃO POR GRUPOS DE INTERESSE

A seguir serão apresentados os resultados da concentração de radônio por empresa estudada (Figura 16).

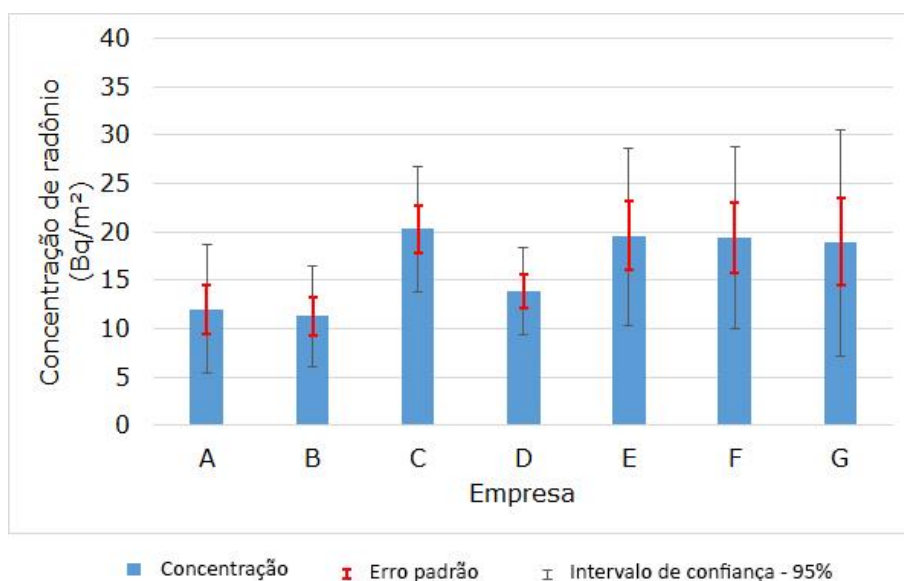


Figura 16 - Concentração de radônio por empresa
Fonte: Autor

A partir dos resultados apresentados na Figura 16 foi possível observar que em média as concentrações variaram entre $11,3 \pm 2,0$ e $20,3 \pm 2,5$ Bq/m³. Os valores encontrados estão abaixo do nível de 200 Bq/m³ considerado normal pela NCRP (1985).

Da mesma forma, a Figura 17 apresenta a análise dos resultados de concentração por ambiente.

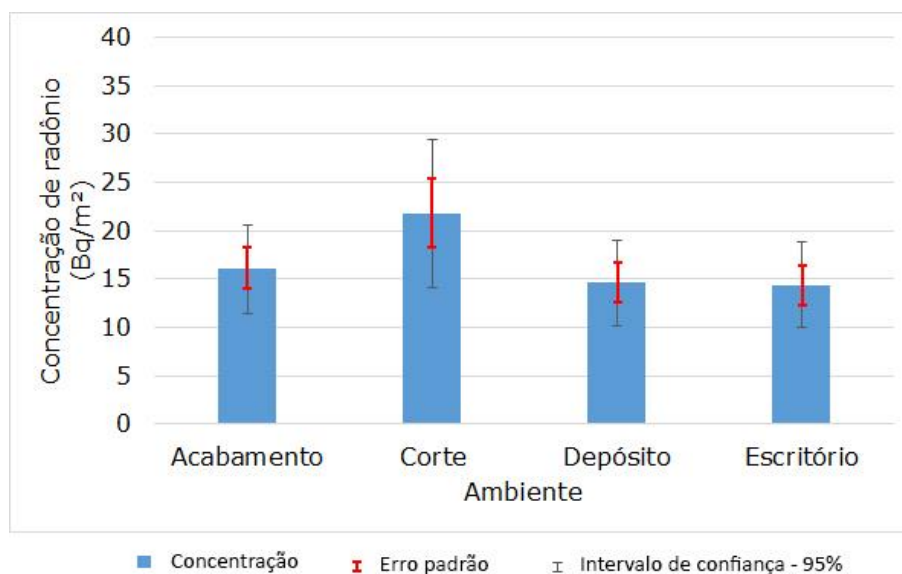


Figura 17 - Concentração de radônio por ambiente
Fonte: Autor

Para os resultados por ambiente (Figura 17), os valores de concentração variaram entre $14,4 \pm 2,0$ e $21,7 \pm 3,5$ Bq/m³. Após realizada análise por intervalo de confiança para um nível de significância de 5% em distribuição t de student, não foi possível afirmar que ocorreram diferenças significativas nos resultados agrupados por empresa ou por ambiente monitorado. Mas é possível observar uma tendência de valores superiores na área de corte.

Também por análise ANOVA, observou-se que “F” calculado é menor que “F” tabelado para um nível de significância de 5% (ou grau de confiança de 95%), o que demonstra que não existe efeito significativo da empresa analisada ou do ambiente nos resultados de concentração.

4.3. AÇÕES MITIGADORAS EM MARMORARIAS

A seguir serão esclarecidos alguns fatores que poderiam influenciar na mitigação do gás radônio nas marmorarias e a melhor forma de reduzir a concentração deste gás nos ambientes, garantindo, assim, a saúde dos trabalhadores.

Nos resultados apresentados na Tabela 9 foi encontrado um valor para a medida de concentração de radônio de 364 Bq/m³ que foi considerado como dado espúrio para as análises. Contudo, este valor foi de fato registrado durante o período de ensaios e a concentração pode classificar o ambiente como nível de “atenção” - de acordo com o NCRP (1985), no qual já seria necessária a adoção de práticas que possam reduzir a concentração do gás. Assim, por este estudo ser sido realizado em uma quantidade reduzida de marmorarias é possível que ocorram registros de alta concentração do gás radônio em outras empresas.

Suspeita-se que este valor medido esteja relacionado à uma placa recém cortada, com presença de minerais radioativos, que permaneceu por alguns dias no depósito (local medido) permitindo que o detector CR-39 registrasse os traços do gás radônio. Desta forma, se faz necessário sugerir ações de mitigação em marmorarias para que a concentração deste gás seja reduzida e não possa gerar um risco aos trabalhadores.

Inicialmente, vale ressaltar existem alguns métodos de mitigação do radônio que consistem no armazenamento do ar ou da água que apresenta alguns traços deste gás por um período de tempo. Assim a quantidade de radônio seria reduzido ao longo do tempo, uma vez que o material radioativo sofreria decaimento de acordo com sua meia vida até que a concentração do gás se tornasse aceitável. Contudo, esta técnica não é válida para locais onde o mineral radioativo se encontra, como é o caso das rochas em marmorarias, uma vez que, mesmo com o decaimento do radônio, sempre haveria mais geração de radônio pelo decaimento dos outros elementos radioativos das séries ²³⁸Urânio, ²³⁵Urânio e ²³²Tório conforme Figura 1 apresentada.

Portanto, a única forma de reduzir a concentração do gás radônio nos ambientes seria garantir uma boa ventilação dos postos de trabalho. O método mais barato que poderia ser aplicado seria garantir a ventilação natural. Novas instalações poderiam prever ventilação cruzada e fluxos forçados de correntes no ambiente, simulando uma exaustão natural do ar dentro da indústria. Outra opção para as

empresas é a instalação de equipamentos de exaustão de ar e de ventilação forçada, em especial no caso de ambientes pequenos e com baixa ventilação.

Indica-se que após a melhoria da circulação de ar seja realizado um monitoramento periódico dos ambientes, garantindo assim uma concentração aceitável do gás. Outra prática aconselhável seria manter a menor quantidade possível de rochas nos postos de trabalho ou em ambientes em que ocorra a permanência dos trabalhadores.

Mais uma das medidas que poderiam auxiliar no controle dos materiais radioativos presente em pedras ornamentais em marmorarias seria a obrigatoriedade dos fornecedores realizarem um controle da composição mineralógica das jazidas antes da extração. Desta forma, as empresas que adquirirem este material já estariam cientes da presença de minerais radioativos e poderiam tomar medidas preventivas ou evitar a compra deste tipo de material. Esta medida facilitara ainda a exportação deste tipo de produto para países que já realizam este tipo de controle.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, com relação à exposição ao radônio Rn em marmorarias da região de Curitiba, as concentrações mostraram-se dentro da normalidade, com a maioria dos valores abaixo de 100 Bq/m^3 e apenas um caso isolado entre 200 e 400 Bq/m^3 , que poderia indicar a necessidade de ações mitigadoras, como a melhoria da ventilação do ambiente.

De uma forma geral a metodologia adotada se apresentou efetiva para avaliar os ambientes com pouco impacto nas atividades desenvolvidas. Também não houve uma correlação estatisticamente significativa entre os ambientes de trabalho e as concentrações do gás, diferentemente do esperado.

Com relação às sugestões para trabalhos futuros propõe-se aprofundar o estudo da emissão de radônio em marmorarias com um controle nas etapas de extração e desdobramento das rochas, bem como análise da microestrutura e composição química das mesmas.

Há também sugestões para o desenvolvimento de um banco de dados que permitisse a estimativa da emissão de gás radônio a partir de materiais de construção bem como estudos da permeabilidade deste gás ou das radiações através dos materiais permitindo, assim, estimar o tempo de emissão do radônio e a dose recebida por usuários dos ambientes.

REFERÊNCIAS

AHN, G. H.; LEE, J.-K. **Construction of an environmental radon monitoring system using cr-39 nuclear track detectors**. Nuclear Engineering and Technology, v. 37, n. 4, p. 395–400, 2005. Korean Nuclear Society. Disponível em: <http://www.koreascience.or.kr/article/ArticleFullRecord.jsp?cn=OJRHBJ_2005_v37n4_395>. Acesso em: 11/7/2015.

ANJOS, R. M.; JURI AYUB, 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, n. 11, p. 1055–1061, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.06.001>>.

BRASIL, M. DA PREVIDÊNCIA SOCIAL. **Base de dados históricos de acidente de trabalho**. Disponível em: <<http://www3.dataprev.gov.br/aeat/>>. Acesso em: 22/7/2015.

CARDOSO, E. D. M. **Apostila educativa. Energia Nuclear**, p. 19, 2011.

CARVALHO, J. **Rochas Ornamentais , Pedras Naturais ou Pedras Dimensionais ?** Boletim de minas 42, v. 42, n. 2, p. 157–159, 2007.

DEL CLARO, F. **Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR**. Dissertação de mestrado. CPGEI, 2013.

CORRÊA, J. N. **Avaliação dos níveis de concentração de radônio em ambientes e águas de poços no Estado do Paraná**. Tese de doutorado. CPGEI, 2011. Disponível em: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/066/43066319.pdf>. Acesso em: 11/7/2015.

FERREIRA, A. D. O. **Avaliação da radioatividade natural em algumas rochas graníticas do estado do Paraná e sua utilização na construção civil**. Tese de doutorado, 2013.

VILLASCHI FILHO, A.; PINTO, M. DE M. **Arranjos Produtivos e Inovação Localizada: o caso do segmento de rochas ornamentais no noroeste do Estado do Rio de Janeiro**. Nota Técnica 14. Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – IE/UFRJ -, 2000.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. DE P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. São Paulo: Abirochas, 2009.

FIOR, L. **Análise da concentração de radônio proveniente dos materiais de construção**. Dissertação de mestrado, 2008.

IBRAM. **REACH: política de controle de substâncias químicas da UE impõe restrições para exportações**. Indústria da mineração. Revista., , n. Ano III. nº 19, 2008.

LINK, W. **Tópicos avançados da metrologia mecânica: confiabilidade metrológica e suas aplicações na metrologia**. 2000.

MACHADO, E. DE O.; ALMEIDA, A. R. DE S.; GALVÃO, R. O.; DILVA, M. T. C. **A importância dos epis para segurança do trabalhador em marmorarias do centro de São Gonçalo**. Trabalho de conclusão de curso, , n. 6, 2012.

MAROCCHI, M.; RIGHI, S.; MARIA BARGOSI, G.; GASPAROTTO, G. **Natural radionuclides content and radiological hazard of commercial ornamental stones: An integrated radiometric and mineralogical-petrographic study**. Radiation Measurements, v. 46, n. 5, p. 538–545, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.03.017>>. .

MINEROPAR. **Perfil dos insumos minerais no Paraná**. Relatórios Panorama de produção mineral no Paraná, 2003.

NCRP. **Evaluation of Occupational and to Radon and ad on Daughters in the United States**. 1985.

OKUMONO, E.; YOSHIMURA, E. **Física das radiações**. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/deg_418789.pdf>. Acesso em: 21/7/2015.

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.

SEWARD, L. E.; DOANE, D. P. **Estatística Aplicada à Administração e Economia** - 4.ed. AMGH Editora, 2014.

SMITH, J.; COTHERN, R. **Environmental Radon**. 1987.

SPÍNOLA, V.; GUERREIRO, L. F.; BAZAN, R. **A Indústria De Rochas Ornamentais. Relatório da agência de fomento do estado da Bahia**, 2004.

TAVARES, J. C. F.; MASCULO, F. S.; SILVA, F. DE A. G. **Condições de trabalho em marmorarias: um estudo de caso**. Nacional de engenharia de produção Anais do encontro, 2000.

UNSCEAR. **Report of the united nations scientific committee on the effects of atomic radiation**. American journal of human genetics, v. 22, n. 5, p. 600–601, 2000.

USEPA. **Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes**. , p. 1–47, 1993.

WILKENING, M. **Radon in the Environment. Studies in Environmental science 40**. Elsevier, 1990.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Who Handbook on Indoor Radon**. , p. 110, 2009. Disponível em:
<<http://apps.who.int/bookorders/anglais/detart1.jsp?sesslan=1&codlan=1&codcol=15&codcch=763>>.

APÊNDICE A – Dados coletados

Apêndice A – Tabela I – Análise de dados espúrios

Empresa	Local	Densidade de traços (nº de traços / cm ²)	Tempo de exposição (dias)	Concentração (Bq/m ³)	di/s	Espúrio
A	Acabamento	64	140	7,72	0,317	OK
A	Acabamento	69	140	8,32	0,306	OK
A	Depósito	82	140	9,89	0,279	OK
A	Escritório	110	140	13,27	0,221	OK
A	Corte	173	140	20,87	0,091	OK
B	Acabamento	80	145	9,31	0,289	OK
B	Acabamento	66	145	7,68	0,317	OK
B	Corte	72	145	8,38	0,305	OK
B	Depósito	119	145	13,85	0,211	OK
B	Escritório	148	145	17,23	0,153	OK
C	Acabamento	128	145	14,90	0,193	OK
C	Corte	144	145	16,76	0,161	OK
C	Escritório	161	145	18,74	0,127	OK
C	Acabamento	175	145	20,37	0,099	OK
C	Depósito	189	145	22,00	0,071	OK
C	Acabamento	249	145	28,98	0,049	OK
D	Escritório	85	140	10,24	0,273	OK
D	Escritório	88	140	10,61	0,267	OK
D	Acabamento	127	140	15,31	0,186	OK
D	Depósito	134	140	16,15	0,172	OK
D	Corte	141	140	16,99	0,157	OK
E	Escritório	79	137	9,73	0,282	OK
E	Depósito	118	137	14,53	0,200	OK
E	Acabamento	173	137	21,30	0,083	OK
E	Escritório	196	137	24,13	0,034	OK
E	Corte	225	137	27,71	0,027	OK
F	Depósito	97	145	11,30	0,255	OK
F	Escritório	147	145	17,12	0,155	OK
F	Acabamento	151	145	17,58	0,147	OK
F	Acabamento	168	145	19,56	0,113	OK
F	Corte	272	145	31,67	0,095	OK
G	Escritório	73	145	8,50	0,303	OK
G	Acabamento	158	145	18,39	0,133	OK
G	Acabamento	163	145	18,97	0,123	OK
G	Corte	254	145	29,56	0,059	OK
G	Depósito	3122	145	363,39	5,797	FORA

Apêndice A – Tabela II - Teste de normalidade

Empresa	Concentração (Bq/m ³)	Distribuição empírica	Distribuição teórica	Desvio 1	Desvio 2
B	7,68	0,03	0,09	0,06	
A	7,72	0,06	0,09	0,03	0,06
A	8,32	0,09	0,11	0,02	0,05
B	8,38	0,11	0,11	0,01	0,02
G	8,50	0,14	0,11	0,03	0,00
B	9,31	0,17	0,14	0,03	0,01
E	9,73	0,20	0,15	0,05	0,02
A	9,89	0,23	0,16	0,07	0,04
D	10,24	0,26	0,17	0,09	0,06
D	10,61	0,29	0,19	0,10	0,07
F	11,30	0,31	0,21	0,10	0,07
A	13,27	0,34	0,31	0,03	0,00
B	13,85	0,37	0,34	0,03	0,00
E	14,53	0,40	0,38	0,02	0,01
C	14,90	0,43	0,40	0,02	0,00
D	15,31	0,46	0,43	0,03	0,00
D	16,15	0,49	0,48	0,01	0,02
C	16,76	0,51	0,52	0,00	0,03
D	16,99	0,54	0,53	0,01	0,02
F	17,12	0,57	0,54	0,03	0,01
B	17,23	0,60	0,54	0,06	0,03
F	17,58	0,63	0,57	0,06	0,03
G	18,39	0,66	0,61	0,04	0,02
C	18,74	0,69	0,63	0,05	0,02
G	18,97	0,71	0,65	0,07	0,04
F	19,56	0,74	0,68	0,06	0,04
C	20,37	0,77	0,72	0,05	0,02
A	20,87	0,80	0,75	0,05	0,03
E	21,30	0,83	0,77	0,06	0,03
C	22,00	0,86	0,80	0,06	0,03
E	24,13	0,89	0,88	0,01	0,02
E	27,71	0,91	0,96	0,04	0,07
C	28,98	0,94	0,97	0,03	0,06
G	29,56	0,97	0,98	0,00	0,03
F	31,67	1,00	0,99	0,01	0,02

Apêndice A - Tabela III - Análise estatística por empresa (student)

Empresa	Medida da densidade	Erro densidade	Concentração	Erro	Intervalo de confiança por t- student	
A	0,030	0,006	12,014	2,573	5,401	18,628
B	0,028	0,005	11,292	2,015	6,112	16,472
C	0,050	0,005	20,292	2,518	14,131	26,453
D	0,034	0,004	13,860	1,759	9,337	18,382
E	0,048	0,008	19,480	3,563	10,321	28,640
F	0,048	0,008	19,447	3,649	10,066	28,827
G	0,047	0,011	18,856	4,524	7,226	30,486

Apêndice A – Tabela IV - Análise estatística por empresa (ANOVA)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,002849	6	0,000475	2,167409	0,076689	2,445259
Dentro dos grupos	0,006135	28	0,000219			
Total	0,008984	34				

Apêndice A – Tabela V - Análise estatística por local (student)

Local	Medida da densidade	Erro densidade	Concentração	Erro	Intervalo de confiança por t- student	
Acabamento	0,040	0,004	16,031	2,131	11,427	20,636
Corte	0,054	0,008	21,707	3,554	13,302	30,111
Depósito	0,036	0,004	14,620	2,049	9,605	19,634
Escritório	0,036	0,004	14,396	2,043	9,775	19,018

Apêndice A – Tabela VI - Análise estatística por local (ANOVA)

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,001547	3	0,000516	2,148708	0,114162	2,911334
Dentro dos grupos	0,007438	31	0,00024			
Total	0,008984	34				