

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS**

ALLAN FELIPE NUNES PERNA

**TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO-222 DE CONCRETO E ARGAMASSA DE
CIMENTO USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

ALLAN FELIPE NUNES PERNA

**TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO-222 DE CONCRETO E ARGAMASSA DE
CIMENTO USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Engenharia” – Área de concentração: Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk

Co-orientadora: Profa. Dra. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

P452t Perna, Allan Felipe Nunes
2016 Taxa de exalação de radônio-222 de concreto e argamassa
de cimento usados na construção civil / Allan Felipe
Nunes Perna.-- 2016.
94 f.: il.; 30 cm

Texto em português com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. Área de concentração: Engenharia
de Materiais, Curitiba, 2016.
Bibliografia: p. 82-88.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Radon. 3.
Concreto. 4. Argamassa. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich.
II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.
III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

ALLAN FELIPE NUNES PERNA

TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO-222 DE CONCRETO E ARGAMASSA DE CIMENTO USADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Sergei Anatolyevich Paschuk, Dr.
UTFPR - orientador

Prof. Valeriy Denyak, Dr.
IPPPP

Prof. Walmor Cardoso Godoi, Dr.
UTFPR

Prof. Pedro Zambianchi Júnior, Dr.
UTFPR

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Ao PPGEM, pelo suporte a este trabalho;

À CAPES, pela bolsa de pesquisa;

Ao Prof. Dr. Sergei, pela orientação, apoio e confiança depositada no trabalho;

A Prof.^a Dr.^a Janine, pela co-orientação, incentivo, confiança e amizade;

Ao Prof. Dr. Valeriy, pela colaboração com o tratamento dos dados;

À toda equipe de laboratório pela ajuda e estímulo constante.

À minha família pelo apoio e incentivo aos estudos.

RESUMO

PERNA, Allan Felipe Nunes. Taxa de exalação de radônio-222 de concreto e argamassa de cimento usados na construção civil. 2016. 94 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

O radônio é um gás presente na atmosfera terrestre e é o segundo maior causador de câncer de pulmão, devido à dose depositada no tecido pulmonar. Este gás possui produtos de decaimento radioativo de meia-vida curta que se acumulam no organismo, contribuindo para a dose efetiva. As principais fontes de radônio são o solo, os materiais de construção e águas subterrâneas. Ambientes residenciais são construídos com materiais que foram fabricados a partir da matéria-prima encontrada no solo. Assim, estes materiais podem contribuir significativamente para a concentração de radônio *indoor*, se a taxa de exalação de radônio for alta. Este trabalho consistiu na determinação da taxa de exalação de ^{222}Rn e da concentração de atividade de radionuclídeos obtida por meio de medidas de espectrometria gama. Os materiais objetos de estudo desta pesquisa, amplamente utilizados em diversas construções de alvenaria, são corpos de prova de concreto e de argamassa de cimento. A metodologia utilizada nesta pesquisa permitiu comparar a taxa de exalação de radônio entre dois modelos de exalação, chamados de modelo 1D e modelo 3D. Os materiais utilizados foram caracterizados com relação à resistência à compressão, no sentido de observar se as características físicas estavam em concordância com os materiais utilizados na construção civil. Também foram realizadas medidas de porosidade, permeabilidade e da composição elementar. As medidas da taxa de exalação de radônio (^{222}Rn) foram tomadas pelo equipamento AlphaGuard em sistema fechado. O valor da taxa de exalação foi calculado por meio de gráficos dos dados experimentais. Uma célula-teste de concreto – um cubo com paredes maciças e interior oco, com o intuito de simular um ambiente em dimensões reduzidas, com paredes de material caracterizado – foi construída para simular a situação de um ambiente cuja concentração de radônio *indoor* seja proveniente apenas do concreto. Resultados qualitativos de EDXRF mostram que os materiais analisados possuem mesma composição. A taxa de exalação de radônio, em $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, encontrada para o concreto foi de: $2,55 \pm 0,03$ para o modelo 1D e $0,461 \pm 0,008$ para o modelo 3D. A taxa de exalação de radônio, em $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, encontrada para a argamassa de cimento foi de: $1,58 \pm 0,03$ para o modelo 1D e $0,439 \pm 0,011$ para o modelo 3D. O índice de atividade calculado foi de $0,3395 \pm 0,0017$ e $0,3106 \pm 0,0017$ e a atividade de rádio equivalente foi de $89,8 \pm 0,4$ Bq/kg e $82,8 \pm 0,4$ Bq/kg para o concreto e argamassa de cimento, respectivamente. A concentração de ^{222}Rn *indoor* da célula-teste, extrapolada para as dimensões de um ambiente de convívio humano, foi de 112 ± 9 Bq/m³, abaixo de 200 Bq/m³, valor recomendado pelo *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) e abaixo de 148 Bq/m³, limite recomendado pela US Environmental Protection Agency (EPA). Ainda assim, este valor é significativo, visto que é relativo apenas à contribuição das paredes de concreto. Tais resultados mostram que o concreto e a argamassa de cimento podem contribuir significativamente para a concentração de radônio *indoor* de ambientes que sejam construídos com estes materiais.

Palavras-chave: Radônio; ^{222}Rn ; taxa de exalação; concreto; argamassa de cimento.

ABSTRACT

PERNA, Allan Felipe Nunes. Exhalation rate of radon-222 from concrete and cement mortar used in civil construction. 2016. 94 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Radon is a gas presents in the atmosphere and it is the second largest lung cancer caused due to the dose deposited in the lung tissue. This gas has radioactive decay products of short half-life that accumulate in the organism, contributing to the effective dose. The main sources of radon are soil, building materials and groundwater. Residential environments are built with materials that were manufactured from the raw materials found in the soil. Therefore, these materials can significantly contribute to the concentration of indoor radon, if the radon exhalation rate is high. This study consisted of the determination of the exhalation rate of ^{222}Rn and the radionuclide activity concentration obtained by gamma spectrometric measurements. The material objects of study of this research, widely used in various masonry buildings, are proof specimens of concrete and cement mortar. The methodology used in this study allowed to compare the exhalation rate of radon between two models of exhalation, called 1D model and 3D model. The materials used were characterized in relation to compressive strength, in order to observe if the physical characteristics were in agreement with the materials used in construction. Measurements of porosity, permeability and elemental composition were also carried. The measures of the exhalation rate of radon (^{222}Rn) were taken by AlphaGuard equipment in a closed system. The value of the exhalation rate was calculated through graphs of experimental data. A concrete test cell - a cube with solid walls and hollow interior, with the aim of simulating an environment in small dimensions, with material characterized wall - was built to simulate the situation in an environment where the concentration of radon indoor comes from only the concrete. Qualitative results of EDXRF show that the analyzed materials have the same composition. The radon exhalation rate, in $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, found to the concrete was: 2.55 ± 0.03 for the 1D model and 0.461 ± 0.008 for the 3D model. The exhalation rate of radon, in $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, found for the cement mortar was: 1.58 ± 0.03 for the 1D model and 0.439 ± 0.011 for the 3D model. The calculated activity index was 0.3395 ± 0.0017 and 0.3106 ± 0.0017 and the equivalent radio activity was $89.8 \pm 0.4 \text{ Bq/kg}$ and $82.8 \pm 0.4 \text{ Bq/kg}$ for concrete and mortar cement, respectively. The indoor concentration of ^{222}Rn from the test cell, extrapolated to the dimensions of a human living environment, was $112 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$, below 200 Bq/m^3 , recommended value by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) and below 148 Bq/m^3 , recommended limit by the US Environmental Protection Agency (EPA). Even so, this value is significant, since it is only relative to the contribution of concrete walls. These results show that concrete and cement mortar can significantly contribute to the concentration of indoor radon of environments that are built with these materials.

Keywords: radon; ^{222}Rn ; exhalation rate; concrete; cement mortar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das contribuições das fontes de radiação nos Estados Unidos.	12
Figura 2 – Distribuição das contribuições das fontes de radiação no mundo.	13
Figura 3 - Esquema de decaimento do ^{222}Rn	22
Figura 4 - Série de decaimento do Urânio.....	23
Figura 5 - Série de decaimento do Tório.....	24
Figura 6 - Série de decaimento do Actínio.....	25
Figura 7 - Mecanismo de transporte de radônio em materiais.....	28
Figura 8 - Diagrama do modelo de exalação 3D e 1D.....	31
Figura 9 - Corpos de prova: concreto e argamassa de cimento.....	35
Figura 10 - Croqui da célula-teste de concreto.....	40
Figura 11 - Detalhamento da célula teste em fotos.....	41
Figura 12 - Ensaio de compressão.....	43
Figura 13 - Detalhamento em imagem da medição da permeabilidade ao ar.....	44
Figura 14 - Esquema da montagem experimental utilizada na EDXRF.....	47
Figura 15 - Espectrômetro gama Canberra.....	48
Figura 16 - Aparato Experimental para medida da taxa de exalação de radônio.....	50
Figura 17 - esquema da montagem experimental para medida da taxa de exalação de radônio.....	50
Figura 18 - Montagem experimental para ventilação do AlphaGuard.....	53
Figura 19 - Câmara desmontada utilizada na medição de concentração de radônio em ambientes indoor.....	54
Figura 20 - Espectro de emissão do corpo de prova de argamassa de cimento.....	59
Figura 21 - Espectro de emissão do corpo de prova de argamassa de cimento.....	60
Figura 22 - Espectro de emissão do corpo de prova de concreto.....	60
Figura 23 - Espectro de emissão do corpo de prova de concreto.....	61
Figura 24 – Gráfico de comparação entre as curvas da taxa de exalação de radônio.....	64
Figura 25 – Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 1.....	65
Figura 26 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 2.....	66
Figura 27 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 3.....	66
Figura 28 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 4.....	67
Figura 29 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 5.....	67
Figura 30 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 6.....	68
Figura 31 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 7.....	68
Figura 32 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 8.....	69
Figura 33 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 9.....	69
Figura 34 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 10.....	70
Figura 35 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 11.....	70
Figura 36 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 12.....	71
Figura 37 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 13.....	71
Figura 38 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 14.....	72
Figura 39 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 15.....	72
Figura 40 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 16.....	73
Figura 41 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 17.....	73

Figura 42 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 18	74
Figura 43 - Gráfico da tensão em função da deformação, argamassa de cimento, CP1	94
Figura 44 - Gráfico da tensão em função da deformação, concreto, CP2	94

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Representação dos decaimentos α , β^- , β^+ e γ	19
Tabela 2 - Energia das partículas do decaimento do ^{222}Rn	22
Tabela 3 - Série do Urânio	23
Tabela 4 - Série do Tório	24
Tabela 5 - Série do Actínio	25
Tabela 6 - Valores da taxa de exalação encontrados na literatura para diferentes tipos de materiais usados na construção civil	31
Tabela 7 - atividade do rádio, tório e potássio encontrados em alguns materiais de construção civil	33
Tabela 8 - Valores do índice de concentração de atividade de materiais de construção relacionados com dose efetiva anual	34
Tabela 9 - Frações granulométricas da areia normalizada	36
Tabela 10 - Materiais colocados na argamassadeira para fabricação da argamassa de cimento	37
Tabela 11 - Materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova de concreto.....	37
Tabela 12 - Material utilizado para construção da célula-teste.....	38
Tabela 13 - Resultado do ensaio de compressão dos corpos de prova de argamassa de cimento	56
Tabela 14 - Resultado do ensaio de compressão dos corpos de prova de concreto.....	56
Tabela 15 - Resultado da resistência a compressão do concreto e da argamassa de cimento	57
Tabela 16 - Valores do tempo referente à permeabilidade ao ar do concreto e da argamassa de cimento	58
Tabela 17 - Resultado da permeabilidade ao ar dos corpos de prova de concreto e de argamassa de cimento	58
Tabela 18 - Valores de massa dos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção por imersão	59
Tabela 19 - Porosidade do concreto e da argamassa de cimento	59
Tabela 20 - Valores de energia de transição dos elementos encontrados no concreto e na argamassa de cimento	61
Tabela 21 - Resultado da análise de espectrometria gama	62
Tabela 22 - Atividade específica do tório no concreto e na argamassa de cimento.....	62
Tabela 23 - Resultado do índice de concentração de atividade dos materiais.....	62
Tabela 24 - Atividade de rádio equivalente do concreto e da argamassa de cimento	63
Tabela 25 – Parâmetros de ajuste da taxa de exalação de ^{222}Rn dos corpos de prova de concreto	75
Tabela 26 - Parâmetros de ajuste da taxa de exalação de ^{222}Rn dos corpos de prova de argamassa de cimento	75
Tabela 27 - Média dos Parâmetros de ajuste da taxa de exalação do concreto	76
Tabela 28 – Média dos Parâmetros de ajuste da taxa de exalação da argamassa de cimento	76
Tabela 29 - Resultado da concentração de ^{222}Rn do sistema (background)	77
Tabela 30 - Resultado da concentração de ^{222}Rn no concreto e na argamassa de cimento.....	77
Tabela 31 - Fator de emissão do concreto e argamassa de cimento	78
Tabela 32 - Número de traços lidos nos detectores CR-39 em uma área de $0,56\text{ cm}^2$	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Motivações.....	14
1.2 Objetivos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Decaimento radioativo e meia-vida	18
2.2 Decaimento radioativo do ²²² Rn e séries radioativas.....	21
2.3 Radônio em materiais de construção	26
2.3.1 Mecanismo de transporte de radônio	27
2.3.2 Coeficiente de emanação.....	29
2.3.3 Taxa de exalação	29
2.3.4 Parâmetros associados à exposição à radiação proveniente de materiais de construção..	32
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 Fabricação dos corpos de prova e construção da célula-teste	35
3.1.1 Argamassa de cimento	36
3.1.2 Concreto	37
3.1.3 Célula-teste	38
3.2 Caracterização dos corpos de prova	41
3.2.1 <i>Slump Test</i>	42
3.2.2 Ensaio de compressão.....	42
3.2.3 Permeabilidade ao ar	43
3.2.4 Porosidade dos corpos de prova	45
3.2.5 Espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF).....	46
3.2.6 Espectrometria gama	47
3.3 Medição da taxa de exalação de radônio	49
3.4 Medição da concentração de radônio em materiais de construção	52
3.5 Medição de concentração de radônio <i>indoor</i>	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Resultado dos ensaios de compressão	56
4.2 Resultado da permeabilidade ao ar	57
4.3 Resultado da porosidade.....	58
4.4 Resultado da análise qualitativa de EDXRF	59

4.5 Resultado da análise de espectrometria gama	62
4.6 Resultado das medidas da taxa de exalação de radônio	63
4.7 Resultado das medições da concentração de radônio nos materiais de construção	77
4.8 Resultado da medida da concentração de radônio da célula-teste.....	78
5 CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS.....	82
APÊNDICE A: MEDIDA DE CURTA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO (MODELO 3D).....	89
APÊNDICE B: MEDIDA DE CURTA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO (MODELO 1D).....	90
APÊNDICE C: MEDIDA DE LONGA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO (MODELO 1D)	92
APÊNDICE D – GRÁFICOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO	94

1 INTRODUÇÃO

O radônio (Rn) é um gás naturalmente radioativo encontrado nos solos, águas subterrâneas e no ar. É um emissor de partículas alfa que faz com que sua inalação represente um grande risco à saúde. Os danos decorrentes das partículas alfa, assim como dos subprodutos de decaimento do ^{222}Rn , estão relacionados à inalação desse gás e sua consequente absorção nos tecidos dos pulmões, o que pode levar a formação de tumores no pulmão (NCI PUBLICATION, 2013; UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2008).

A possibilidade de o radônio induzir o câncer de pulmão é vastamente aceita pela comunidade científica, e a exposição ao radônio e seus subprodutos é responsável por cerca da metade da dose recebida pela população, proveniente de radiações ionizantes naturais (UNSCEAR, 2006). As figuras 1 e 2 ilustram esta situação.

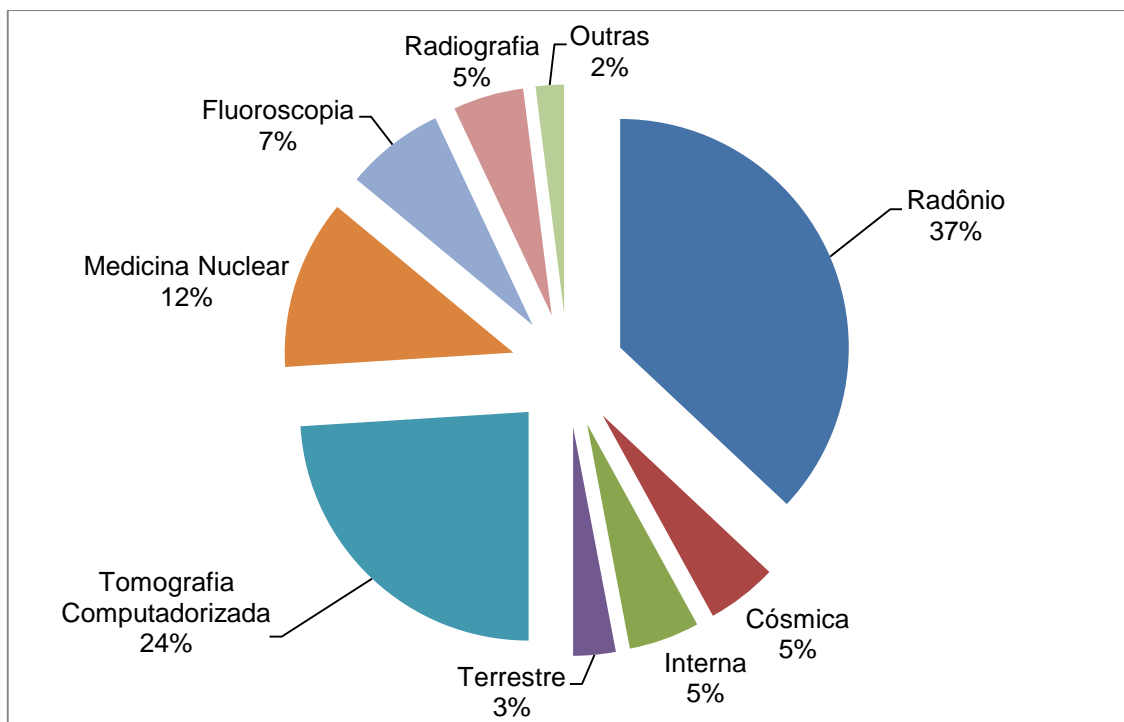


Figura 1 - Distribuição das contribuições das fontes de radiação nos Estados Unidos.

Fonte: adaptado de EPA, 2015

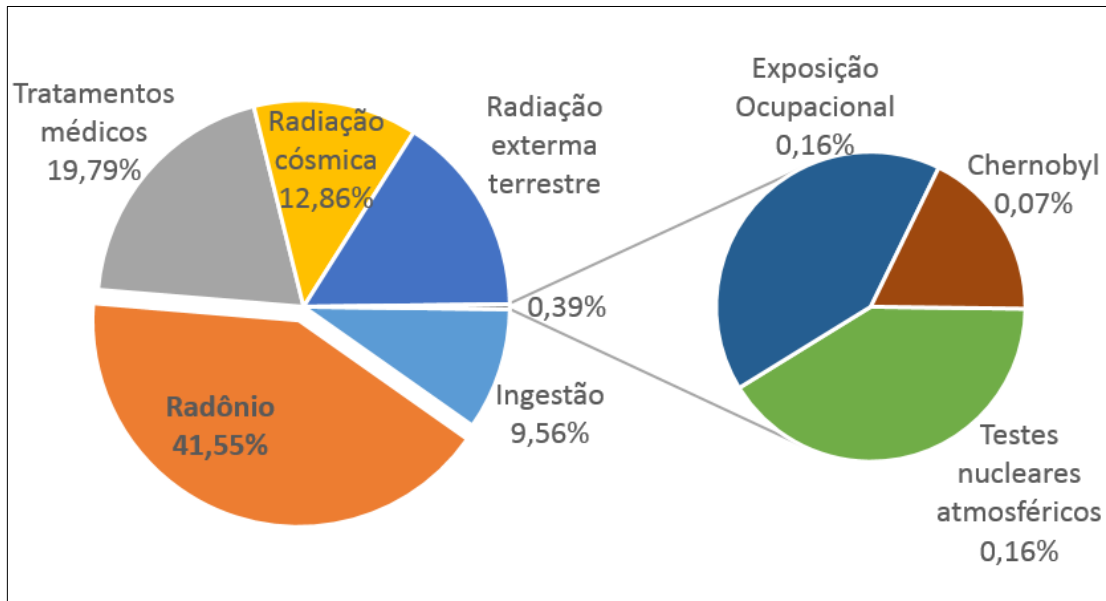


Figura 2 – Distribuição das contribuições das fontes de radiação no mundo.

Fonte: IAEA, 2015

Na maioria dos casos, a exposição às fontes de radiação natural é mais significativa do que às produzidas pelo homem. Salvo nos casos em que os indivíduos são submetidos a procedimentos médicos radiológicos, por meio do mau uso de fontes de radiação, ou também, ao entrar em contato com acidentes radiológicos ou nucleares, ou ainda, em locais de trabalho comprometidos (UNSCEAR, 2000).

Em ambientes térreos, o solo é o principal responsável pela concentração de radônio *indoor* (EPA, 2001). Todavia, em cidades com grande número de construções verticais, como prédios, a concentração do radônio em ambientes *indoor* se deve principalmente aos materiais de construção (ZHANG *et al.* 2012). Os materiais de construção são fabricados com minerais produzidos no solo e a alta concentração de radônio presente nestes materiais pode contribuir para alta concentração *indoor* (TUCCIMEI *et al.* 2009).

Esta dissertação apresenta medidas de concentração de radônio em materiais de construção de concreto e argamassa de cimento. Estes materiais de construção foram escolhidos por serem amplamente utilizados em diversas construções de alvenaria, como casas e edifícios e também construções subterrâneas, como garagens, cofres, metrô dentre outros. Além disso, este trabalho apresenta medidas da taxa de exalação do gás ^{222}Rn dos materiais avaliados.

A análise da taxa de exalação de radônio de materiais de construção contribui fundamentalmente para elaboração de propostas de soluções para mitigação com

relação à possíveis níveis de concentração de radônio acima dos limites propostos pelos órgãos internacionais de saúde pública como a *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (UNSCEAR, 2008), o *International Commission on Radiological Protection* (ICRP, 2010) e a *US Environmental Protection Agency* (EPA, 2009).

1.1 Motivações

Tendo em vista o crescente interesse em se conhecer os níveis de radônio no ar e a contribuição dos materiais de construção para estes valores, bem como a escassez de dados em esfera nacional, o grupo de pesquisa em radiações ionizantes da UTFPR, em colaboração com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN) realiza medidas de radônio no ar, solos e águas e também faz estudos relacionados com a presença de radionuclídeos e emanações radioativas de materiais de construção.

O Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR especializou-se em medidas de radônio no ar, no solo e na água. O grupo de pesquisa em radiações ionizantes, desde 2003, tem elaborado diferentes metodologias que envolvem detectores de estado sólido e equipamentos eletrônicos de medidas instantâneas, como por exemplo, o *AlphaGuard* (SAPHYMO, 2014).

Em geral, os trabalhos que caracterizam a exalação de radônio apresentam diferenças nos modelos teóricos e experimentais para o cálculo da taxa de exalação de radônio de materiais de construção, como por exemplo os estudos de Zhang *et al.* (2012), Tan *et al.* (2013) e Chauhan e Kumar (2013). Costa (2011) obteve resultados experimentais da taxa de exalação e comparou com o valor obtido por meio da equação teórica fornecida pela Unscear (2000), o que o levou a concluir, ainda, que o valor teórico é, muitas vezes, superestimado.

Desta forma, os fatores que motivam o desenvolvimento deste trabalho são: a necessidade em se obter dados sobre o radônio no Brasil, a relação desta pesquisa com a saúde pública e o Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR, onde há infraestrutura com equipamentos modernos e pesquisas em andamento sobre materiais de construção.

1.2 Objetivos

Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa é medir a taxa de exalação do concreto e da argamassa de cimento, em condições de uso da construção civil, materiais de construção que são amplamente utilizados em diversas construções de alvenaria.

Objetivos específicos

Nessa pesquisa pretende-se também:

- Fabricar corpos de prova de concreto e argamassa de cimento com propriedades físicas similares aos materiais usados comumente na construção dos prédios comerciais e residências.
- Estabelecer uma metodologia para medição da taxa de exalação com o uso do equipamento AlphaGuard (Saphymo).
- Caracterizar os corpos de prova e respectivos materiais por meio de medidas de porosidade, permeabilidade, espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) e espectrometria gama.
- Verificar a exposição à radiação proveniente do concreto e da argamassa de cimento a partir de valores de concentração de atividade de radionuclídeos obtidos por meio de medidas de espectrometria gama.
- Construir uma célula-teste de concreto para simular a situação de um ambiente cuja concentração de radônio *indoor* é proveniente apenas do concreto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Partículas de alta energia de raios cósmicos incidentes na atmosfera da Terra e radionuclídeos originados na crosta terrestre são os dois principais contribuintes de exposição à radiação natural (UNSCEAR, 2000). Estes radionuclídeos estão presentes em toda a matéria do ecossistema, inclusive no próprio corpo humano, constituindo a chamada radiação terrestre. As partículas de alta energia, presentes em maior intensidade em altas altitudes, constituem a chamada radiação cósmica.

Práticas humanas podem alterar a exposição às fontes de radiação natural. As pessoas podem estar sujeitas ao aumento da exposição à radiação natural em seus locais de trabalho de forma expressiva. É o caso de trabalhadores em minas subterrâneas, profissionais envolvidos no processo de mineração em geral e tripulação de aeronaves (UNSCEAR, 2000). Além disso, o homem tem incorporado substâncias radioativas em produtos de consumo, principalmente durante o processo de fabricação (SHAW *et al.*, 2016). Algumas das aplicações mais recentes (nos últimos 150 anos) envolvem o uso de artigos de vidro que contêm em sua composição radionuclídeos como o urânio. Outro exemplo é o caso de objetos pintados com tintas compostas por trítio e promécio, radionuclídeos encontrados na natureza.

A Terra é continuamente bombardeada por partículas de alta energia originadas no espaço. Essa radiação cósmica interage com os constituintes da atmosfera, produzindo uma série de interações que contribuem para a exposição a radiação. A exposição cósmica pode ser dividida conforme a altitude, tendo em vista que decresce à medida que entra na atmosfera até chegar ao solo. No nível do solo, os maiores contribuintes para a exposição de radiação proveniente de raios cósmicos são partículas chamadas *muons*, com energia entre 1 e 20 GeV (UNSCEAR, 2000).

Além disso, a dose de radiação cósmica depende da latitude (UNSCEAR, 2000). O campo magnético da Terra deflete as partículas que entram no topo da atmosfera, permitindo que apenas as partículas de alta energia atravessem nos pontos de baixa latitude. Este fenômeno é chamado de efeito de latitude geomagnética (*geomagnetic latitude effect*). Assim, a taxa da dose de radiação cósmica é mínima no equador e máxima nos pontos próximos ao polo magnético da Terra.

Com relação à radiação terrestre, o corpo humano é irradiado por fontes externas, principalmente por radiação gama dos radionuclídeos presentes na série de

decaimento de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K . Presentes também no corpo humano, estes radionuclídeos irradiam os órgãos com partículas *alpha* e *beta*, além de raios gama. Outros radionuclídeos como ^{87}Rb , ^{138}La , ^{147}Sm , ^{176}Lu e aqueles da série do ^{235}U existem na natureza em concentrações baixas, de tal forma que contribuem pouco para a exposição de radiação terrestre se comparados com os outros elementos citados primeiramente (UNSCEAR, 2000).

As fontes de radiação estão presentes fora e dentro do corpo humano, assim, classifica-se a exposição à radiação natural como sendo interna ou externa. A exposição interna deriva da inalação ou ingestão de radionuclídeos terrestres. Partículas de poeira contendo radionuclídeos da série de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th produzem doses por inalação, no qual o principal é o radônio, particularmente o isótopo ^{222}Rn (UNSCEAR, 2000). Doses por ingestão estão, principalmente, relacionadas com radionuclídeos da série de decaimento do ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th presentes em água potável e nos alimentos (UNSCEAR, 2000).

No que se refere à exposição humana à radiação terrestre, uma das classificações usuais é a subdivisão em *Outdoor*, ambientes ao ar livre, abertos, que não são caracterizados como abrigos e *Indoor*, ambientes fechados que podem ser considerados como abrigos, casas, prédios e outras construções em geral.

É importante lembrar que a radiação cósmica está presente nos dois casos, *outdoor* e *indoor*. A exposição *indoor* à radiação gama – principalmente aquela proveniente por materiais de construção fabricados a partir do solo – é maior se comparada a exposição *outdoor* (UNSCEAR, 2000). Quando o tempo de ocupação do ambiente interno é levado em conta, a exposição *indoor* pode ser ainda mais significativa. Por um lado, é possível que o abrigo reduza o nível de exposição à radiação natural; por outro, dependendo do material que foi utilizado para a construção, a exposição *indoor* pode ser muito superior a *outdoor*, o que comumente acontece.

Resultados de medidas de concentração de radônio nos estados brasileiros realizadas em ambientes *indoor* por Corrêa (2006), Corrêa (2011), Del Claro (2013), Geraldo *et al* (2005) e Santos (2010), mostram que, em sua maioria, o nível de radônio está abaixo de 200 Bq/m^3 , atendendo a recomendação da agência internacional ICRP (1993). Todavia, de acordo com as referências disponíveis, por mais que os níveis de ^{222}Rn *indoor* não sejam alarmantes, os mesmos autores, dentre outros, mediram, em algumas regiões do Brasil, concentrações de radônio acima dos limites estabelecidos

pelos organismos internacionais, principalmente se for tomado como referência a EPA (2009), que considera concentrações de ^{222}Rn acima de 148 Bq/m^3 como nível elevado. As mesmas pesquisas mostram alta concentração de radônio em solo, águas subterrâneas e em alguns materiais de construção.

Um estudo das concentrações de ^{222}Rn realizado em 125 municípios de 50 estados pertencentes aos Estados Unidos (USA) mostrou que, aproximadamente, 61% das residências americanas excedem o limite de concentração, de 148 Bq/m^3 , preconizado pela EPA (UNSCEAR, 2006).

Pesquisas realizadas (CORRÊA, 2006 e 2011), (DEL CLARO, 2013), (COSTA, 2011), (SANTOS, 2010) apontam que há baixo número de medidas no Brasil sobre o radônio, principalmente se for considerada a extensão do país, o que dificulta a elaboração de uma legislação federal. Todavia, a Norma Regulamentadora 3.01/007 (CNEN, 2005), estabelece como limite o valor de 10 mSv/a para dose, o que corresponde ao valor aproximado de 300 Bq/m^3 para concentração *indoor* no país.

O nível de exposição à radiação terrestre depende do tipo de rocha que deu origem ao solo. Por exemplo, valores mais altos de radiação estão associados a rochas ígneas, como granito, e valores mais baixos a rochas sedimentares (UNSCEAR, 2000). No caso do granito (composto de quartzo, mica e feldspato), Anjos *et al.* (2005) relaciona a concentração de ^{238}U , ^{232}Th e ^{40}K com seus respectivos constituintes.

2.1 Decaimento radioativo e meia-vida

O conteúdo desta seção tem como base conceitos de física nuclear descritos por Eisberg e Resnick (1979).

Os decaimentos nucleares ocorrem sempre que o núcleo do átomo se encontra em um estado de energia que não é o mais baixo para um sistema com certa quantidade núcleons (prótons e nêutrons).

Reações nucleares levam núcleos a estados instáveis. Essas reações podem ser produzidas em aceleradores de partículas ou podem estar relacionadas a fenômenos naturais que ocorrem há bilhões de anos. Elementos cuja instabilidade nuclear decorre desses fenômenos são denominados radioativos. Já o processo para obtenção da estabilidade nuclear é chamado de radioatividade ou decaimento radioativo.

O núcleo dos átomos, pode emitir naturalmente radiação ionizante, principalmente, por meio dos modos de decaimento alfa α , beta β^- , beta β^+ e gama γ , cujo poder de penetração cresce respectivamente. A tabela 1 apresenta a notação utilizada para representar estes modos de decaimentos, onde: X é o elemento pai e Y é o elemento filho; A é a massa atômica; Z é o número atômico; X^* o elemento fora do seu estado de menor energia e Q é a energia liberada no processo de decaimento radioativo.

Tabela 1 - Representação dos decaimentos α , β^- , β^+ e γ

Decaimento α	${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He + Q$
Decaimento β^-	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + Q$
Decaimento β^+	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + e^+ + Q$
Emissão γ	${}^A_ZX^* \rightarrow {}^A_ZX + \gamma$

A radiação alfa possui o menor poder de penetração, todavia é altamente nociva ao corpo humano. Enquanto trabalhava na Universidade de Cambridge, na Inglaterra, Rutherford mostrou que a partícula α é composta por um núcleo do átomo de hélio, ou seja, possui carga positiva, dois prótons e dois nêutrons juntos. Os valores das energias de decaimento α vão desde 4,1 Mev para o ${}^{232}_{90}Th$ até 8,9 Mev para o ${}^{212}_{84}Po$. A energia típica com que são emitidas é de 5 Mev, o que corresponde a uma velocidade de cerca de 15.000 km/s.

Elementos que sofrem decaimento alfa modificam sua massa nuclear A em 4 unidades de massa atômica (u.m.a.) e transformam-se em elementos com número atômico Z reduzido em duas unidades. Além da partícula emitida durante o decaimento, o núcleo libera uma quantidade de energia extra Q .

O decaimento β^- ocorre quando um nêutron, presente no núcleo do átomo, transforma-se em um próton p e emite um elétron e^- acompanhado de um anti-neutrino $\bar{\nu}$. Esta partícula é a anti-partícula do neutrino, possui carga nula e massa extremamente pequena (algumas centenas de vezes mais leve que os elétrons). Assim, a massa nuclear permanece a mesma e o número atômico é aumentado em 1 unidade.

O decaimento β^+ ocorre quando um próton, presente no núcleo do átomo, transforma-se em um nêutron n e emite um pósitron e^+ acompanhado de um neutrino

ν . Assim, a massa nuclear permanece a mesma e o número atômico é reduzido em 1 unidade.

A emissão beta ocorre se a massa inicial do núcleo pai é maior que a soma da massa do elétron com a massa do núcleo do elemento filho. A energia disponível no decaimento é igual ao excesso de massa multiplicada pela velocidade da luz ao quadrado. A energia cinética da partícula β , de fontes naturais, pode variar desde uma fração de 1 MeV até mais de 10 MeV, sendo comumente um pouco inferior a 1 MeV.

O núcleo de um átomo, em um estado excitado de energia, pode emitir um fóton para atingir um estado de menor energia de excitação ou o seu estado fundamental, o que consiste no decaimento gama. É o caso de um decaimento *beta* que produz um núcleo em estado excitado de energia. Desta forma, o elemento permanece o mesmo, pois número atômico não muda. Os raios γ são fótons de radiação eletromagnética com energia superior a aproximadamente 1 keV.

O decaimento radioativo possui caráter probabilístico de ocorrência. Para um sistema contendo vários átomos da mesma espécie em um dado instante – e considerando que seus núcleos não encontram-se desexcitados – uma certa quantidade de núcleos pode sofrer algum tipo de decaimento em um intervalo de tempo dt posterior.

A Equação 2.1 representa o número de núcleos que sofrem decaimento, onde λ é a constante de decaimento (também chamada de constante de desintegração), N é o número de núcleos de material radioativo, dN é o número de núcleos que sofreram decaimentos em um intervalo de tempo dt . Como N decresce com o tempo, dN é negativo o que justifica o sinal negativo.

$$dN = -N\lambda dt \quad \text{Eq. 2.1}$$

Reagrupando os termos e integrando-se, obtém-se a Equação 2.5.

$$\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt = -\lambda t \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$\ln N(t) - \ln N(0) = \ln \frac{N(t)}{N(0)} = -\lambda t \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$\frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \quad \text{Eq. 2.5}$$

$N(0)$ é o número de núcleos que não haviam decaído no instante inicial e $N(t)$ é o número de núcleos que ainda não haviam decaído no instante subsequente t .

A vida média τ é o tempo médio que o núcleo sobrevive antes de decair, que é inversamente proporcional a constante de decaimento λ , Equação 2.6. O intervalo de tempo necessário para que o número de núcleos que ainda não decaíram diminua pela metade é chamado de meia-vida $T_{1/2}$. A relação entre esses dois intervalos de tempo é obtida diretamente a partir da lei de decaimento e resulta na Equação 2.7.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$T_{1/2} = (\ln 2)T = 0,693 T \quad \text{Eq. 2.7}$$

2.2 Decaimento radioativo do ^{222}Rn e séries radioativas

Em um sistema, existem vários núcleos radioativos decaindo sucessivamente uns nos outros através do decaimento α e/ou outros processos de decaimento. Por exemplo, o $^{230}_{90}\text{Th}_{140}$ decai por emissão α no $^{226}_{88}\text{Ra}_{138}$, que, por sua vez, emite uma outra partícula α , decaindo no $^{222}_{86}\text{Rn}_{136}$, e assim por diante até o último seja um núcleo estável.

O isótopo ^{222}Rn pode sofrer decaimento radioativo com a emissão de partículas α de três energias diferentes. A tabela 2 mostra a energia referente à partícula alfa para cada possibilidade, bem como a energia do fóton que é emitido em seguida. É importante ressaltar que a possibilidade mais provável de acontecimento, cuja probabilidade é cerca de pelo menos três ordens de grandeza superior as outras, leva em conta apenas a emissão de uma partícula alfa, ou seja, não é seguida de emissão de fóton. O esquema de decaimento do ^{222}Rn pode ser visualizado na figura 3.

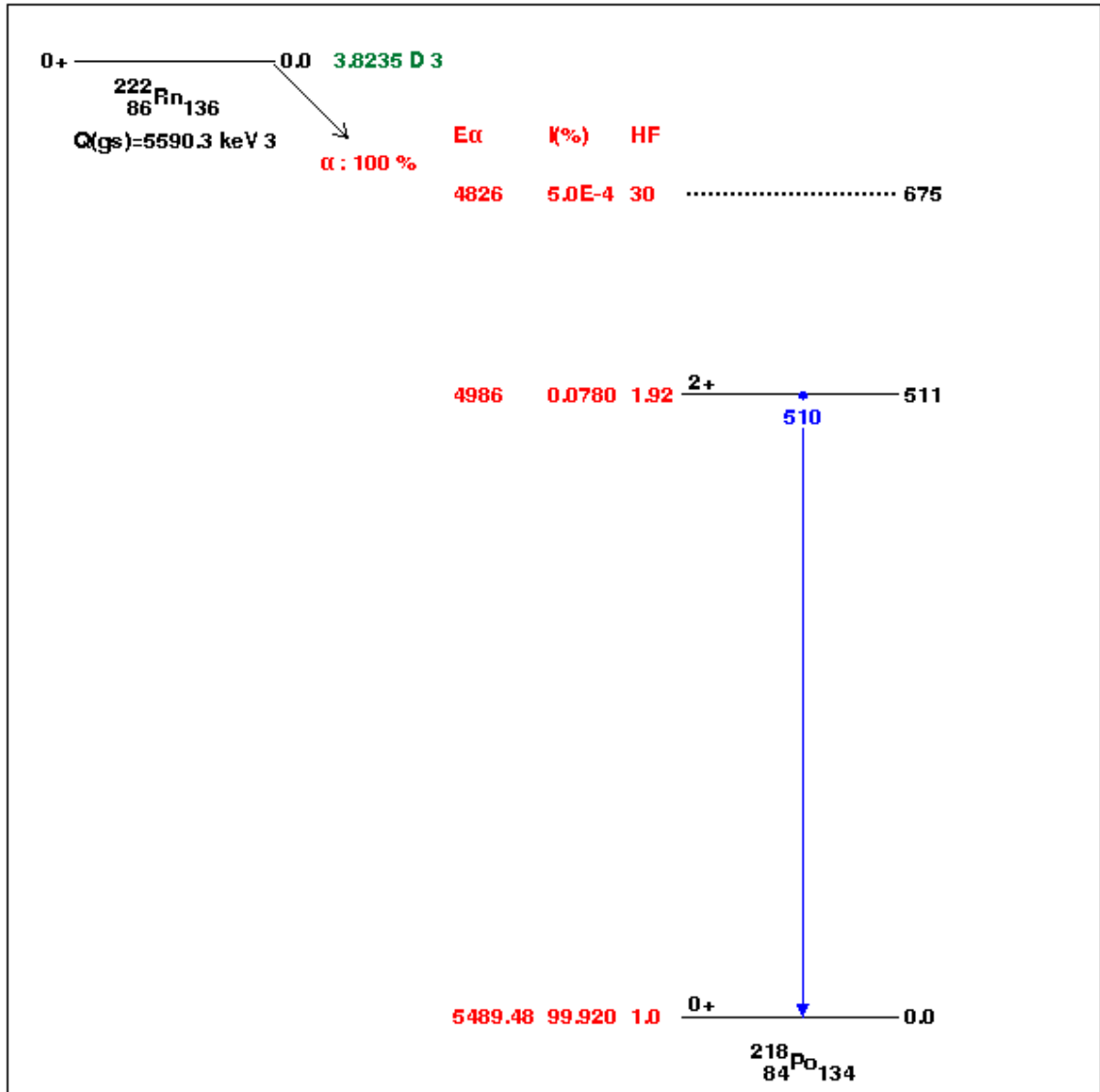


Figura 3 - Esquema de decaimento do ^{222}Rn

Fonte: NNDC, 2015

Tabela 2 - Energia das partículas do decaimento do ^{222}Rn (NNDC, 2015)

Decaimento ^{222}Rn	
Energia da partícula alfa (keV)	Intensidade (%)
4826	$5,00 \cdot 10^{-4}$
4986	0,078
5489,48	99,92
Energia da radiação gama ou raio X (keV)	Intensidade (%)
510	0,076

Os três principais isótopos do radônio são originados da série de decaimento do ^{238}U , ^{232}Th e ^{235}U que estão apresentadas nas figuras 4, 5 e 6 com informações detalhadas nas tabelas 3, 4 e 5.

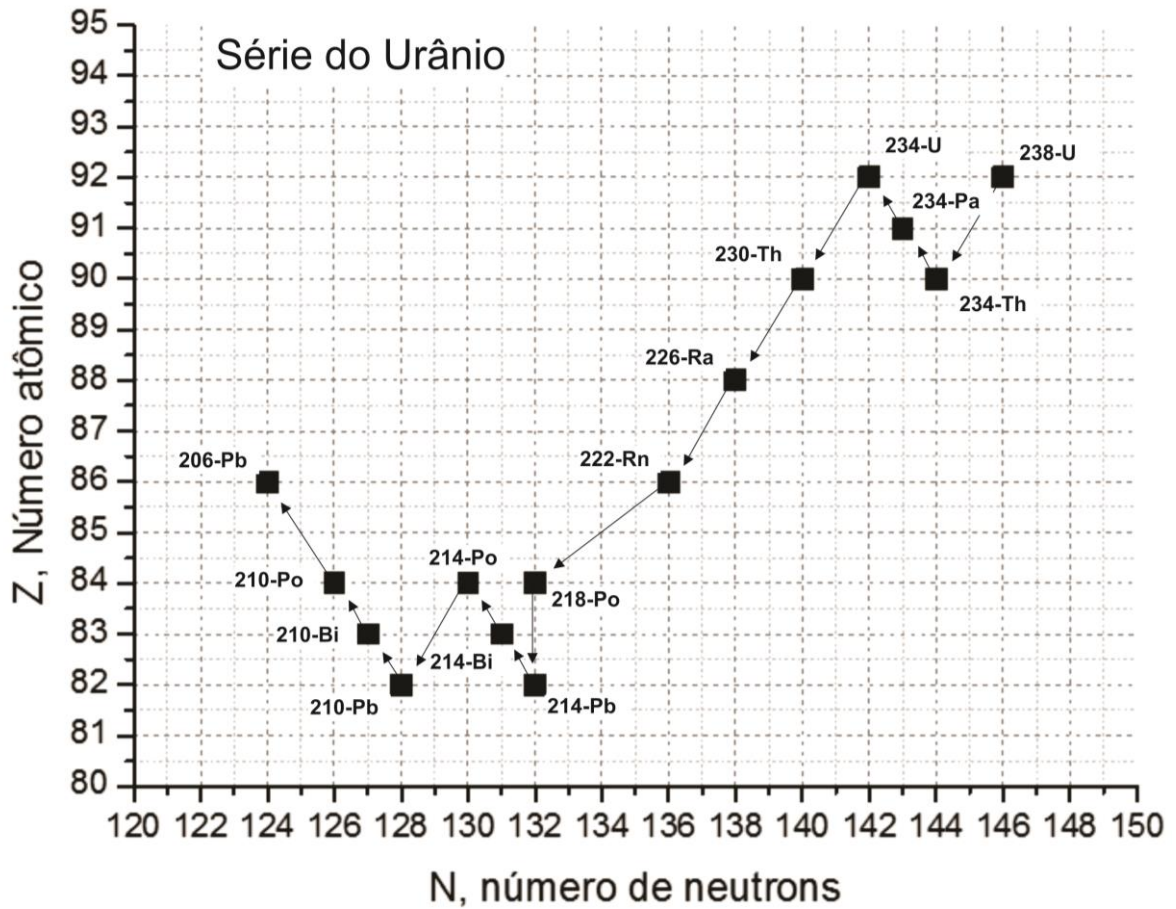


Figura 4 - Série de decaimento do Urânio

Fonte: Autoria própria, baseado em (NNDC, 2015)

Tabela 3 - Série do Urânio (NNDC, 2015)

Série do Urânio				
Nuclídeo	Z	N	Meia-vida	Principais radiações
238-U	92	146	4,47 E9 anos	alfa
234-Th	90	144	24,1 dias	beta
234-Pa	91	143	1,16 minutos	beta
234-U	92	142	2,455 E5 anos	alfa
230-Th	90	140	7,54 E4 anos	alfa
226-Ra	88	138	1600 anos	alfa
222-Rn	86	136	3,8235 dias	alfa
218-Po	84	132	3,098 minutos	alfa 99,98%
214-Pb	82	132	26,8 minutos	beta
214-Bi	83	131	19,19 minutos	beta 99,98%
214-Po	84	130	164 E-3 segundos	alfa
210-Pb	82	128	22,2 anos	beta
210-Bi	83	127	5,01 dias	beta 100%
210-Po	84	126	138,376 dias	alfa
206-Pb	86	124	Estável	nenhuma

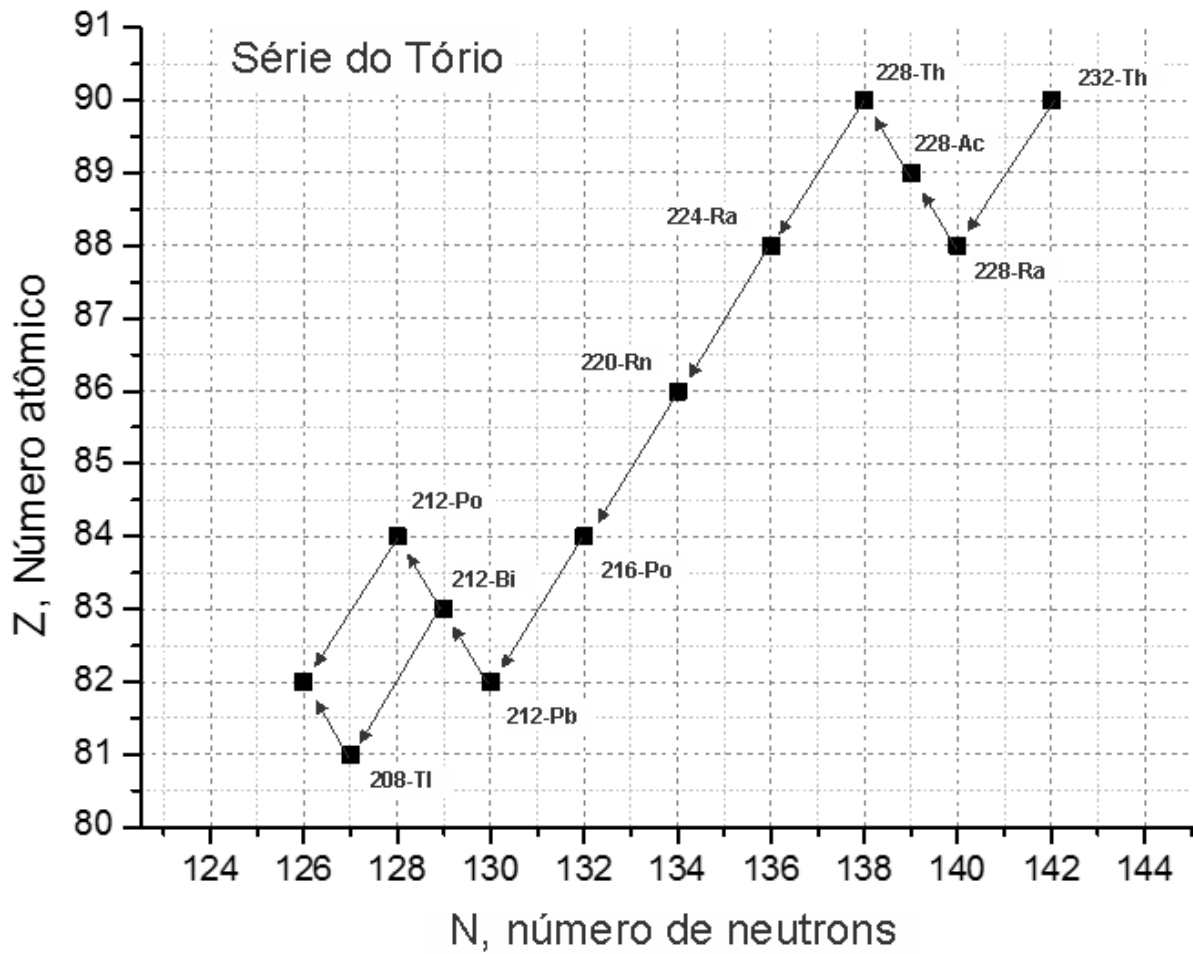


Figura 5 - Série de decaimento do Tório

Fonte: autoria própria, baseado em (NNDC, 2015)

Tabela 4 - Série do Tório (NNDC, 2015)

Série do Tório									
Radionuclídeo	Z		N		Meia-vida		Principais radiações		
232-Th	90		142		1,4 E10 anos		alfa		
228-Ra	88		140		5,75 anos		beta		
228-Ac	89		139		6,15 horas		beta		
228-Th	90		138		1,9116 anos		alfa		
224-Ra	88		136		3,6319 dias		alfa		
220-Rn	86		134		55,6 segundos		alfa		
216-Po	84		132		0,145 segundos		alfa		
212-Pb	82		130		1,64 horas		beta		
212-Bi	83		129		60,55 minutos		beta 64%	alfa 36%	
212-Po 228-Tl	84 81		128 127		0,229 E-6 s	3,053 minutos	alfa	beta	
208-Pb	82		126		Estável		nenhuma		

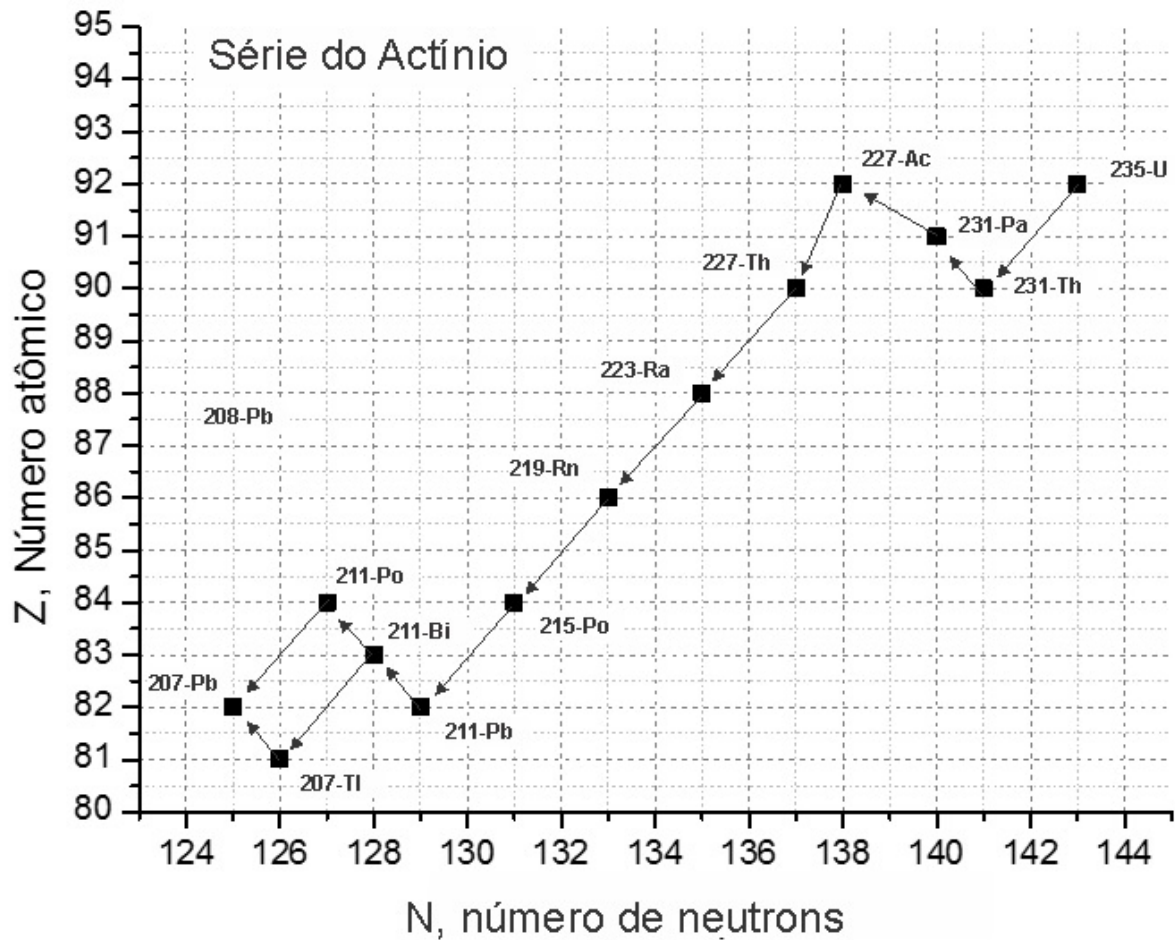


Figura 6 - Série de decaimento do Actínio

Fonte: autoria própria, baseado em (NNDC, 2015)

Tabela 5 - Série do Actínio (NNDC, 2015)

Série do Actínio				
Radionuclídeo	Z	N	Meia -vida	Principais radiações
235-U	92	143	7,04 E8 anos	alfa
231-Th	90	141	25,5 horas	beta 98,62%
231-Pa	91	140	3,276 E4 anos	alfa
227-Ac	92	138	2,772 anos	beta 98,62%
227-Th	90	137	18,68 dias	beta
223-Ra	88	135	11,43 dias	alfa
219-Rn	86	133	3,96 segundos	alfa
215-Po	84	131	1,781 E-3 segundos	alfa 100%
211-Pb	82	129	36,1 minutos	alfa
211-Bi	83	128	2,14 minutos	alfa 99,73% gama 0,273%
207-Tl 211-Po	81 84	126 127	4,77 minutos 0,516 s	alfa beta
207Pb	82	125	Estável	nenhuma

2.3 Radônio em materiais de construção

O ^{222}Rn pode se incorporar à atmosfera interna (*indoor*) de duas maneiras, difundindo-se pelo solo e materiais de construção – através de rupturas na fundação – e por meio da própria exalação deste gás pelos materiais sólidos (UNSCEAR, 2000). O radônio emanado dos materiais de construção atinge uma maior relevância em algumas áreas do mundo, onde rochas ricas em termo de precursores de radônio, são utilizadas na indústria da construção, quer como pedras de tamanho grande ou como formas granulares para preparo de cimentos. A taxa de exalação de radônio é o parâmetro que melhor expressa o acúmulo deste elemento no interior de materiais geológicos (TUCCIMEI *et al.* 2009).

A radioatividade dos materiais de construção depende dos minerais dos quais são feitos. Ou seja, a parcela de concentração de radônio *indoor* devido aos materiais de construção depende da espessura, taxa de exalação do gás e, por conseguinte, da atividade de rádio (BIKIT, 2011), já que a radiação do ^{222}Rn é proveniente do decaimento do ^{226}Ra . A taxa de exalação do radônio, definida na seção 2.4.3, depende da quantidade de rádio presente na fonte, do fator de emanação, do coeficiente de difusão do gás no material, da porosidade e densidade do material (TAN *et al.*, 2013).

Chauhan e Kumar (2011) e Bikit *et al.* (2011) realizaram medidas com materiais de construção com objetivo de determinar a taxa de exalação do radônio. Tais trabalhos concluíram que diferenças na granulidade dos materiais afetam a taxa de exalação do radônio – que é o caso da pedra brita vermelha, bloco cerâmico e concreto celular auto clavado (siporex) – no caso do concreto, Bikit *et al.* (2011) observaram que quanto maior a granulação do siporex, menor será a quantidade de radônio que sai do material.

Estudos como os de Petropoulos *et al.* (2001), mostram a necessidade de investigação, controle e classificação desses materiais. Sob as especificações do grupo europeu ERRICCA (*European Research into Radon In Construction Concerted Action*) os autores descrevem as técnicas de identificação da exalação de radônio pelo concreto em 20 amostras (lajes) padronizadas e preparadas por 13 países. Os resultados mostraram que há diferença considerável entre os valores encontrados, de acordo com o local de onde foi retirada a matéria-prima. Alguns valores se mostraram superiores aos permitidos pelas legislações locais.

Recentemente, departamentos de construção civil da China estuda a possibilidade de diminuir a exposição ao gás radônio por meio do controle da taxa de

exalação de radônio de materiais de construção. Entretanto, a quantidade adequada para controle e como medir a taxa de exalação precisamente ainda não estão bem estabelecidas pelos órgãos de regulamentação do país (ZHANG *et al.*, 2012).

Todavia, um material de construção com alta concentração de radônio só contribuirá significativamente se a taxa de exalação tiver valor suficiente para permitir que o ^{222}Rn saia rapidamente da amostra. Assim, a análise da taxa de exalação de radônio por materiais utilizados na construção civil é relevante no contexto atual.

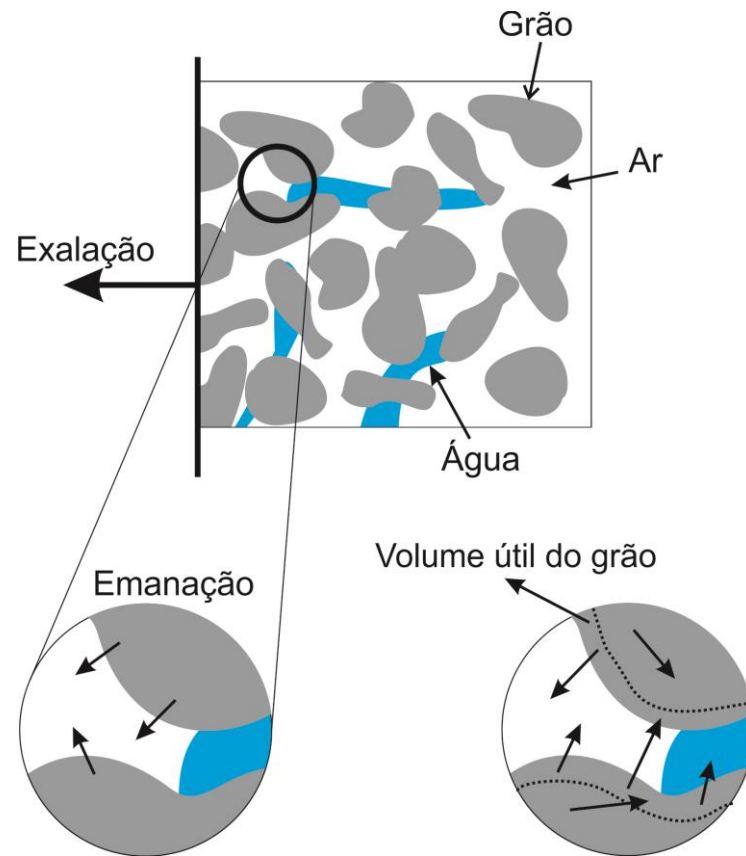
2.3.1 Mecanismo de transporte de radônio

A seguir, discorre-se como o átomo de radônio, proveniente do decaimento radioativo do rádio, sai do material de construção e chega à atmosfera, o que pode contribuir razoavelmente para o aumento da concentração *indoor*. Como o foco do trabalho é a análise do concreto e argamassa de cimento, a explicação é descrita acerca dos materiais de construção, apesar de ser muito similar para o solo e minerais presentes na crosta terrestre.

Na figura 7, o material está representado e é formado por três regiões: grãos, a matriz que contém os constituintes da matéria sólida; água; e ar, responsável pela formação de poros. Também é ilustrada a diferença do processo de emanação e exalação.

Quando um átomo de rádio sofre decaimento, uma partícula alfa é emitida e o radônio é gerado, que por sua vez, é liberado da matriz sólida do material por recuo (*recoil*). Este é o princípio do processo chamado de emanação. O rádio está presente no grão em estado sólido. Dependendo da localização deste elemento no grão, o radônio pode ser emanado. Para que isto aconteça, o elemento pai deve estar dentro do volume útil, também chamado de intervalo de recuo, uma região que fica próxima à superfície do grão. A emanação é o movimento do átomo de radônio do interior do grão para o espaço intersticial (espaço poroso) (SANTOS, 2008).

Uma vez presente no ar dentro do material de construção, o radônio pode atingir a superfície e chegar à atmosfera principalmente devido ao processo de difusão. Este processo, de forma específica, é chamado de exalação: transferência do espaço poroso para a atmosfera (MACACINI, 2008).



* Dimensões da figura fora de escala

Figura 7 - Mecanismo de transporte de radônio em materiais

Fonte: autoria própria

Caso o processo de exalação seja demorado, o radônio pode sofrer decaimento e não atingir o ambiente *indoor*. Desta forma é necessário pensar em termos de meia-vida. O isótopo ^{222}Rn tem probabilidade muito maior de ser exalado do que o ^{220}Rn (torônio), visto que a meia-vida deste é da ordem de dezenas de segundos e daquele é da ordem de dias. A probabilidade é menor ainda para o ^{219}Rn , cuja meia vida é 3,96 segundos.

A difusão está relacionada com a diferença de concentração entre os meios. Ou seja, existe uma tendência de uma substância migrar de um meio para outro de acordo com o gradiente de concentração. Em geral, há presença de radônio muito mais significativa no material de construção se comparada com o ambiente *indoor*. Assim, é muito mais provável que o radônio se difunda do material para a atmosfera do que da atmosfera para o material, por mais que isto também possa acontecer. O mesmo raciocínio vale para o radônio presente no grão. É mais provável que saia do grão e atinja o poro do que o contrário, desde que o radônio seja gerado no volume útil do grão.

2.3.2 Coeficiente de emanação

O fator de emanação (f), coeficiente de emanação ou poder de emanação pode ser calculado pela fração entre a atividade de radônio A_{Rn} liberada do material e a atividade de rádio A_{Ra} presente no mesmo (HASSAN *et al.* 2009), como mostra a Equação 2.8. Ou seja, o coeficiente de emanação carrega a informação da quantidade de átomos que saem do grão e atingem o espaço poroso.

$$f = \frac{A_{Rn}}{A_{Ra}} \quad \text{Eq. 2.8}$$

A distribuição de rádio nos grãos, a quantidade de água presente no material, a temperatura, e o tamanho do grão são os fatores que influenciam veementemente no processo de emanação, logo, no coeficiente de emanação (HASSAN *et al.*, 2009).

A distribuição de rádio no grão não é homogênea, em geral, o elemento pai encontra-se distribuído mais próximo da superfície do grão do que em seu interior (HASSAN *et al.*, 2009). A medida que o tamanho do grão é reduzido, a razão entre a área superficial e o volume aumenta. Assim, quanto menor o tamanho do grão, maior será o coeficiente de emanação, pois este cresce à medida que aumenta a quantidade de rádio próxima a superfície (HASSAN *et al.*, 2009).

2.3.3 Taxa de exalação

A taxa de exalação de radônio é definida como o número de átomos que saem do material por unidade de área por unidade de tempo (TUCCIMEI *et al.* 2009). Usualmente usa-se a unidade $\left(\frac{Bq}{m^2 \cdot h}\right)$. Esta grandeza também pode ser definida como sendo o número de átomos que saem do material por unidade de massa por unidade de tempo $\left(\frac{Bq}{kg \cdot h}\right)$.

Os fatores que influenciam a taxa de exalação são, principalmente: a quantidade de água presente, a porosidade, o tamanho do grão, a temperatura, a pressão e a geometria da amostra (HASSAN *et al.* 2009).

Uma das formas possíveis de medir a taxa de exalação de materiais é por meio do monitoramento do crescimento da concentração de radônio em função do tempo, de acordo com a Equação 2.9 (PRETOPOULOS *et al.* 2001 *apud* TUCCIMEI *et al.*

2009). Para se fazer isso, é necessário que a concentração seja monitorada em um ambiente fechado, por exemplo em uma câmara ou em um contêiner.

$$C(t) = C_i \cdot e^{-\lambda \cdot t} + \frac{E \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})}{\lambda \cdot V} \quad \text{Eq. 2.9}$$

onde C é a concentração de ^{222}Rn $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$, C_i é a concentração inicial de ^{222}Rn $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3}\right]$, λ é a constante de decaimento $[\text{h}^{-1}]$, t é o tempo $[\text{h}]$, E é a taxa de exalação de ^{222}Rn $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{h}}\right]$ e V é o volume total livre para circulação de ar. O primeiro termo da soma leva em conta o decaimento do ^{222}Rn presente inicialmente no sistema, enquanto que o segundo diz respeito ao crescimento exponencial do ^{222}Rn até atingir uma situação de equilíbrio. Quanto maior for a taxa de exalação, maior será a concentração de radônio, no interior do ambiente fechado, ao se atingir o equilíbrio.

Comumente as amostras são pedaços de material de construção com superfície completamente irregular. Para realização da medida da taxa de exalação é necessário que a amostra seja cortada para melhorar o aspecto geométrico e facilitar no cálculo da taxa de exalação. O formato em cubo, cilíndrico ou retangular são uma boa opção de corte.

Como já foi mencionado, o valor de E depende da superfície de exalação, que, por conseguinte, depende do tipo de modelo de exalação. A figura 8 apresenta duas situações, uma em que a exalação de radônio ocorre através de seis superfícies de um corpo de prova cúbico e outra através de uma superfície. Estas situações serão denominadas de modelo 3D (à esquerda, figura 8) e modelo 1D (à direita, figura 8). Para representar o modelo 3D é necessário que todas as faces do corpo de prova estejam livres para exalar gás, enquanto que para o modelo 1D é necessário vedar o mesmo, de tal forma que apenas uma face esteja livre para exalar gás. As paredes, o piso e o teto de um ambiente residencial são melhor representados pelo modelo 1D.

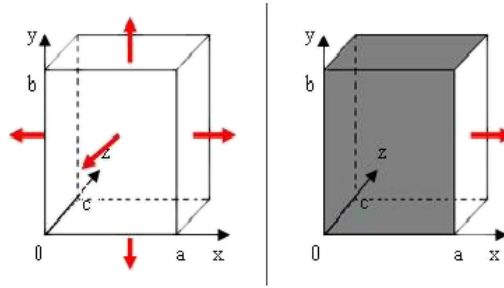


Figura 8 - Diagrama do modelo de exalação 3D e 1D

A tabela 6 apresenta alguns valores de taxa de exalação, encontrados em alguns trabalhos, de diversos materiais usados na construção civil.

Tabela 6 - Valores da taxa de exalação encontrados na literatura para diferentes tipos de materiais usados na construção civil

Local	Material	Taxa de exalação $\left(\frac{Bq}{m^2 \cdot h}\right)$	Referência
Índia	Tijolo cru	0,160 ± 0,010	VIRK e SHARMA, 2001
	Tijolo	0,042 ± 0,003	
	Ardósia	0,038 ± 0,009	
	Tijolo cimentado	0,024 ± 0,005	
	Mármore	0,026 ± 0,002	
Canadá	Drywall	0,038 ± 0,021	CHEN <i>et al.</i> , 2010
	Mármore	0,017 ± 0,008	
	Cerâmica	0,092 ± 0,013	
	Ardósia	1,92 ± 0,17	
Grécia	Tijolo de argila	0,21 ± 0,18	STOULOS <i>et al.</i> , 2003
	Concreto	3,51 ± 2,19	
	Ladrilhos de granito	1,24 ± 1,19	
Alemanha	Granito	0,288 - 2,232	KELLER <i>et al.</i> , 2001
	Arenito	0,504 - 1,728	
	Calcário	0,54 - 10,80	
	Pedra-pomes	0,036 - 0,756	
	Concreto	0,18 - 2,70	
	Concreto aerado	0,432 - 2,448	
	Gesso natural	0,072 - 0,288	
Fosfogesso	0,288-29,88		
Itália	Tijolo	0,007 - 0,0276	RIGHI e BRUZZI, 2006
	Concreto	0,0089 - 0,016	
	Argamassa	0,0123 - 0,0150	
	Argamassa de cal	0,0040 ± 0,0005	
	Arenito	0,0099 - 0,014	
	Calcário	0,034 - 0,036	

2.3.4 Parâmetros associados à exposição à radiação proveniente de materiais de construção

Materiais que contenham radionuclídeos em sua composição podem ser considerados como uma fonte de exposição. Nesses casos, deve-se observar, principalmente, a atividade do ^{238}U , do ^{232}Th , do ^{40}K , ^{226}Ra e ^{224}Ra (FATHIVAND *et al.*, 2006; TURHAN *et al.*, 2008).

As maneiras de verificar o perigo associado à exposição à radiação proveniente de materiais de construção estão associadas a parâmetros pré-estabelecidos. A título de exemplo, a dose anual efetiva para um indivíduo que mora em uma casa construída com blocos de concreto é de 0,25 mSv (EUROPEAN COMMISSION, 1999). Este valor é encontrado considerando que o indivíduo permanece um tempo de 7000 horas por ano no interior da residência e a atividade de potássio, tório e rádio é de 400 Bq/kg, 30 Bq/kg e 40 Bq/kg, respectivamente.

Níveis de investigação podem ser criados para propósitos práticos. Devido ao fato da dose efetiva ser proveniente de vários radionuclídeos presentes no material, pode-se representar o nível de investigação na forma de um índice de concentração de atividade. A *European Commission* (1999) propõe o cálculo deste índice de acordo com a equação 2.10, onde A_{Ra} , A_{Th} e A_K são as atividade de ^{226}Ra , do ^{232}Th e do ^{40}K , expressas em Bq/kg, do material de construção.

$$I = \frac{A_{Ra}}{300 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}} + \frac{A_{Th}}{200 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}} + \frac{A_K}{3000 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}} \quad \text{Eq. 2.10}$$

A tabela 7 apresenta valores ou intervalos de atividade do rádio, tório e potássio de alguns materiais de construção civil encontrados em alguns trabalhos brasileiros ou de outras regiões do mundo.

Tabela 7 - atividade do rádio, tório e potássio encontrados em alguns materiais de construção civil

País/Local	Material	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Referência
Brasil Belo Horizonte	Brita	31,8 ± 0,8	110,8 ± 8,2	*ND	SANTOS, 2010
	Tijolo	48,7 ± 0,9	147,7 ± 12,3	*ND	
	Mistura para Tijolo	38,4 ± 0,1	135,4 ± 12,3	*ND	
	Telha	75,5 ± 1,4	114,9 ± 8,2	*ND	
	Granito	33,2 ± 1,2	86,2 ± 4,1	*ND	
	Cimento	205 ± 2,2	49,2 ± 4,1	*ND	
	Gesso	0,7 ± 0,1	< 4,1	*ND	
Brasil Curitiba	Cimento Portland	41,27 ± 0,44	19,60 ± 0,19	174,5 ± 2,4	NARLOCH, 2015
	Gesso natural	1,91 ± 0,10	1,14 ± 0,06	*ND	
	Fosfogesso	18,34 ± 0,34	17,43 ± 0,21	*ND	
	Areia	11,4 ± 0,2	12,2 ± 0,1	620,2 ± 4,5	
	Argamassa de cimento Portland	18,9 ± 2,2	14,05 ± 0,09	509 ± 12	
	Argamassa de gesso natural	8,90 ± 0,18	9,435 ± 0,006	465 ± 11	
	Argamassa de fosfogesso	13,119 ± 0,037	13,507 ± 0,008	465 ± 11	DEL CLARO, 2012
	Areia	11,4 ± 0,2	12,2 ± 0,1	620,2 ± 4,5	
	Argamassa	22,0 ± 0,3	48,8 ± 0,3	1091,6 ± 5,6	
	Brita azul	36,4 ± 0,4	66,4 ± 0,3	1058,3 ± 5,6	
Brita vermelha	10,8 ± 0,2	15,0 ± 0,1	79,1 ± 1,6		
Concreto	20,4 ± 0,3	34,5 ± 0,2	849,5 ± 5,2		
Tijolo	29,9 ± 0,4	36,5 ± 0,3	178,6 ± 3,0		
Brasil Curitiba	Cerâmico	38,9 ± 1,7	46,1 ± 1,8	188 ± 12	FIOR, 2008
	Concreto	21,1 ± 0,9	19,7 ± 0,9	737 ± 44	
Europa	Concreto	40 - 240	30 - 190	400 - 1600	EUROPEAN COMMISSION, 1999
	Concreto leve/aerado	60 - 2600	40 - 190	430 - 1600	
	Brita vermelha	50 - 200	50 - 200	670 - 2000	
	Brita de silício-calcários	10 - 25	10 - 30	330 - 700	
	Pedras naturais usadas na construção	60 - 500	60 - 310	640 - 4000	
	Gesso natural	10 - 70	10 - 100	70 - 200	
Israel	Concreto	18 - 67	15766	16 - 1100	HAQUIN, 2008
	Concreto leve	10 - 60	6 - 66	51 - 870	
	Tijolo	7 - 140	8 - 127	227 - 1140	
	Cimento	13 - 107	7 - 62	48 - 564	

*ND: não definido

O índice de concentração de atividade não deve exceder os valores apresentados na tabela 8 de acordo com o critério de dose escolhido de 0,3 ou 1 mSv⁻¹ (EUROPEAN COMMISSION, 1999).

Tabela 8 - Valores do índice de concentração de atividade de materiais de construção relacionados com dose efetiva anual (EUROPEAN COMMISSION, 1999)

Critério de dose	0,3 mSv a ⁻¹	1 mSv a ⁻¹
Materiais usados na estrutura da construção, exemplo: concreto	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Materiais de revestimento e de superfície, exemplo: telhas, tábuas, placa de gesso, etc.	$I \leq 2$	$I \leq 6$

A *European Commission* (1999) recomenda que o índice I serve apenas como parâmetro que identifica se determinado material pode se tornar preocupante no que se refere a contribuição para a dose efetiva. Qualquer tipo de restrição ao uso do material de construção deve ser baseado em uma avaliação da dose separadamente. Tal avaliação precisa levar em conta o modo específico de como é empregado o uso do material em questão.

Outro parâmetro importante que pode ser calculados a partir da atividade de mais de um radionuclídeo é a Atividade de Rádio Equivalente (Ra_{eq}). Este fator considera a atividade do ²²⁶Ra, do ²³²Th e do ⁴⁰K de acordo com a equação 2.11 (AL-SULAITI *et al.*, 2008 *apud* BERETKA e MATHEW, 1985). A atividade de Ra_{eq} é usada para avaliar o perigo à exposição aos materiais de construção que contenham estes radionuclídeos.

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43 \cdot A_{Th} + 0,077 \cdot A_K \quad \text{Eq. 2.11}$$

O valor da Atividade de Rádio Equivalente não deve passar dos 370 Bq/kg (UNSCEAR, 2000).

3 METODOLOGIA

A metodologia contou com medidas da taxa de exalação que foram feitas por meio da análise do monitoramento do crescimento da concentração do gás ^{222}Rn em função do tempo, em um ambiente fechado.

Os corpos de prova feitos de concreto ou argamassa de cimento foram submetidos a ensaio de caracterização como: compressão, porosidade, permeabilidade, espectroscopia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) e espectrometria gama. Estes ensaios tiveram o objetivo de obter informações físicas que possam ser relacionadas com a taxa de exalação de ^{222}Rn .

Por fim, uma célula-teste de concreto foi construída com o objetivo de medir a concentração *indoor* de ^{222}Rn . Assim, este valor, calculado a partir da taxa de exalação obtida da amostra de concreto, pode ser comparado com o valor medido da concentração *indoor*.

3.1 Fabricação dos corpos de prova e construção da célula-teste

Para os experimentos voltados às medidas de concentração de radônio, no intuito de estabelecer a taxa de exalação, foram fabricados dois tipos de corpos-de-prova. Um feito de concreto e outro feito de argamassa de cimento, ambos de geometria cilíndrica, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura.



Figura 9 - Corpos de prova: concreto e argamassa de cimento (da esquerda para direita)

Fonte: Autoria própria

3.1.1 Argamassa de cimento

Os procedimentos para a produção de argamassa de cimento foram feitos conforme a NBR 7215 (1996).

O material foi processado na argamassadeira, cujo volume permite produzir 8 corpos-de-prova. Utilizou-se o traço 1:3:0,48 (cimento:areia:água), com areia normalizada, separada nas seguintes frações de granulometria: grossa (#16)¹, média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100), e cimento do tipo CPV. A granulometria da areia utilizada está de acordo com a tabela 9. A areia normalizada é fornecida, para pesquisas em geral, pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Tabela 9 - Frações granulométricas da areia normalizada (NBR 7214, 2012)

Número da peneira	Denominação	Abertura nominal da peneira
16	grossa	entre 2,4 mm e 1,2 mm
30	média grossa	entre 1,2 mm e 0,6 mm
50	média fina	entre 0,6 mm e 0,3 mm
100	fina	entre 0,3 mm e 0,15 mm

Os materiais utilizados para fabricação da argamassa de cimento foram adicionados na argamassadeira na seguinte ordem: água, cimento e areia. A tabela 10 apresenta as especificações dos materiais para fabricação da argamassa de cimento.

O cimento foi adicionado à água nos primeiros 30 segundos e nos 30 segundos seguintes foram adicionados os quatro tipos de areia. Durante essa adição utilizou-se a velocidade mais lenta de rotação do misturador. Imediatamente após o término da colocação da areia, a velocidade do misturador foi aumentada para o máximo permitido e mantida por 30 segundos. Após esse tempo, desligou-se o misturador por 1,5 minutos. Nesse período retirou-se, com auxílio de uma espátula, a argamassa que ficou aderida às paredes da cuba e à pá, para que fosse misturada com o restante da massa que, a seguir, permaneceu em repouso. Por fim, o misturador foi ligado na velocidade alta por mais 1 minuto.

¹ Observar as aberturas das peneiras (#) na tabela 6.

Tabela 10 - Materiais colocados na argamassadeira para fabricação da argamassa de cimento

		traço	massa específica (g/cm ³)	consumo (kg/m ³)	massa (kg)
cimento		1	3,12	487,683	0,843
areia	grossa	3	2,4	1463,049	0,632
	média grossa				0,632
	média fina				0,632
	fina				0,632
água		0,48	1	234,088	0,404

Para a produção final dos corpos-de-prova, as paredes dos moldes tiveram aplicação de um produto desmoldante e, em seguida, a argamassa de cimento foi moldada em 2 camadas por meio de compactação manual de 12 golpes com haste de socamento². Os moldes foram mantidos em atmosfera úmida para cura inicial. Posteriormente, os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada de cal até a data de ruptura.

3.1.2 Concreto

O concreto foi processado numa betoneira de 400 litros para produção dos corpos-de-prova. Utilizou-se o traço 1:2:3:0,5 (cimento:areia:brita:água), com areia comum e cimento tipo CPV.

Primeiramente a betoneira foi imprimada³ com o mesmo traço. Os materiais foram adicionados na seguinte ordem: brita, 80% de água, cimento, areia, 20% de água. O tempo de mistura garantiu uma perfeita homogeneidade do concreto. A tabela 11 apresenta as especificações dos materiais colocados na betoneira.

Tabela 11 - Materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova de concreto

	traço	massa específica (g/cm ³)	consumo (kg/m ³)
cimento	1	3,12	344,371
areia	2	2,4	688,742
brita 0	3	2,4	1033,113
água	0,5	1	172,185

² Haste de socamento: é uma barra de aço, com 600 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, com superfície lisa, seção transversal circular e extremidade de socamento semi-esférica.

³ Imprimir a betoneira: sujar a betoneira com o mesmo material para garantir que a massa não fique aderida na superfície e tenha perda de material.

Após a massa do concreto estar concluída, foi realizado o *slump test* (descrito detalhadamente no item 3.2.1). O teste indicou que não haveria necessidade de refazer a mistura.

Para a produção final dos corpos-de-prova de concreto, as paredes dos moldes tiveram a aplicação de um produto desmoldante e em seguida o concreto foi moldado em 4 camadas por meio de compactação manual de 30 golpes com haste de socamento. Os moldes foram mantidos em atmosfera úmida para cura inicial, em seguida os corpos-de-prova foram desmoldados e submetidos à cura em água saturada de cal até a data de ruptura.

3.1.3 Célula-teste

Foi construída uma célula-teste de concreto, com cimento CPIIZ-32, areia comum e brita zero. O processo de fabricação foi idêntico ao descrito no item 3.1.2. O traço (proporção entre os materiais) têm os valores descritos na tabela 12. Porém foi necessário adicionar 650 g de água para corrigir a consistência do concreto, visto que o *slump test* com o traço adotado mostrou que o concreto estava seco e não adequado para montagem da célula-teste (o *slump test* foi realizado três vezes até que se obteve a consistência desejada).

A massa específica da areia foi determinada por meio do uso do picnômetro⁴, um recipiente de vidro com uma rolha esmerilhada com um tubo capilar que permite obter precisamente o volume da amostra de areia. A massa específica da brita foi informada pelo fornecedor e a do cimento pelo fabricante.

Tabela 12 - Material utilizado para construção da célula-teste

	traço	massa específica (g/cm ³)	consumo (kg/m ³)	massa (kg)
cimento	1	2,97	351,583	7,383
areia	2	2,64	703,167	14,766
brita 0	3	2,4	1054,750	22,150
água	0,5	1	175,792	3,692

⁴ Picnômetro: recipiente de aferição utilizado na medição da massa volumétrica de sólidos ou líquidos.

A célula-teste desenvolvida é um cubo com paredes maciças e interior oco, com o intuito de simular um ambiente em dimensões reduzidas, com paredes de material caracterizado. A célula-teste é delimitada por um cubo externo de dimensões: 30 cm x 30 cm x 30 cm; e um cubo interno centralizado e oco de dimensões: 20 cm x 20 cm x 20 cm. Sendo assim, as paredes possuem 5 cm de espessura, uma delas é removível, o que torna a parte interna acessível. A figura 10 mostra um *croqui* da célula-teste.

Criou-se um molde de compensado de madeira, com revestimento para a concretagem da célula-teste. Não foi necessário passar desmoldante, porém o molde foi molhado para que não houvesse perda de água da massa de concreto para a madeira.

O concreto foi adensado no molde de madeira com o auxílio de uma mesa vibratória para facilitar a formação da base e evitar o aparecimento de bolhas de ar provenientes da má formação do concreto. Portanto, não houve necessidade de usar a haste de socamento.

A célula-teste permaneceu na câmara úmida por três dias, submersa em água saturada com cal. Não houve teste de compressão para avaliar a resistência do material. A figura 11 mostra um conjunto de fotos que detalha a fabricação da célula-teste.

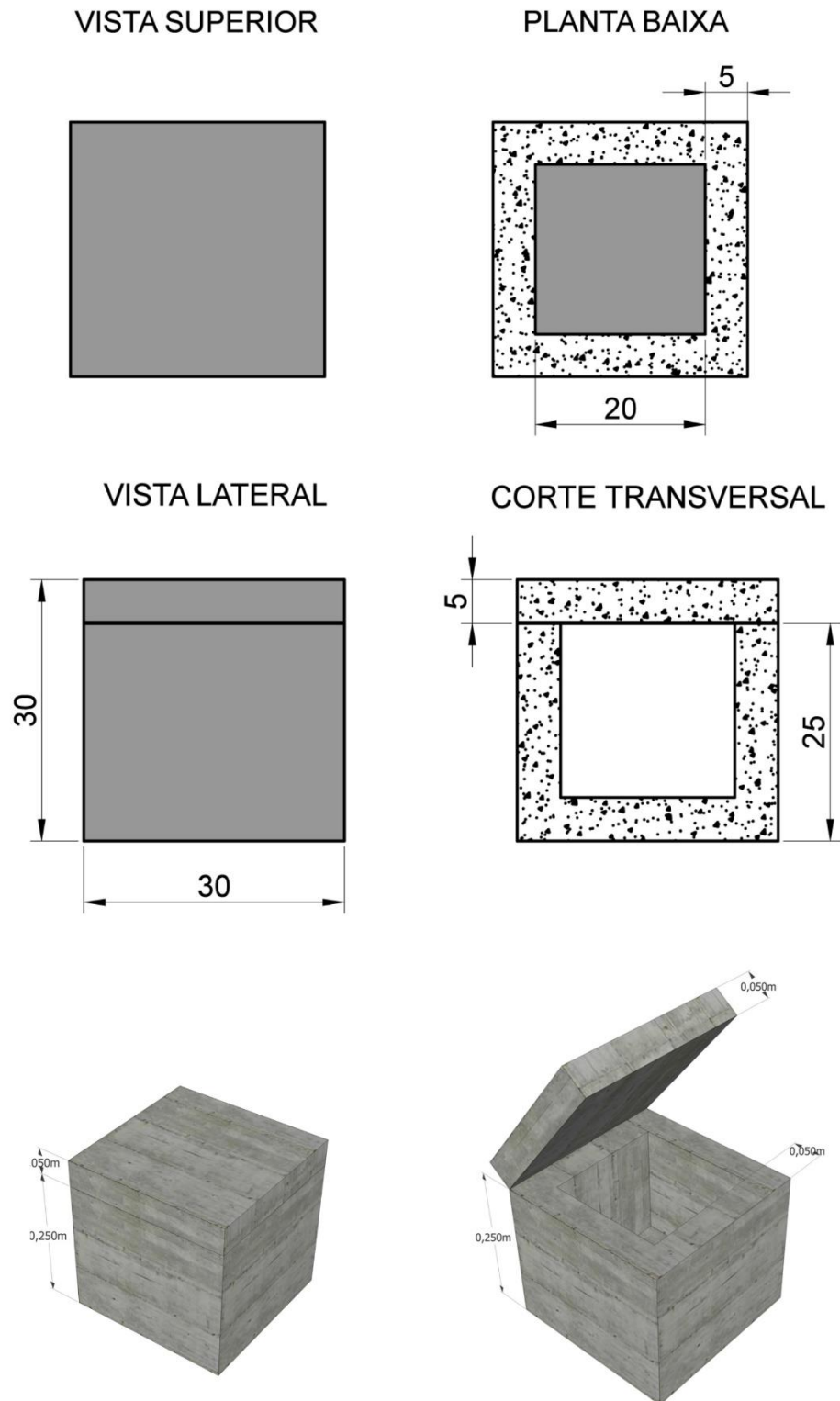


Figura 10 - Croqui da célula-teste de concreto

Valores em centímetro

Fonte: autoria própria



Adensamento na mesa vibratória



Massa de concreto no molde



Vista do interior



Parede removível



Célula-teste submersa na câmara úmida



Célula-teste montada

Figura 11 - Detalhamento da célula teste em fotos

Fonte: autoria própria

3.2 Caracterização dos corpos de prova

Foram realizadas diferentes medidas e ensaios específicos da construção civil (descritos a seguir) para caracterização dos corpos de prova. Além disso, o material foi submetido à estudo experimental para ser analisado quanto ao radônio e outros radionuclídeos como ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K .

3.2.1 *Slump Test*

O *slump test*, também chamado de ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, é realizado antes da moldagem para verificar a trabalhabilidade do concreto de acordo com NBR NM 67 (1998). Trata-se de um ensaio da construção civil em que um tronco de cone metálico de diâmetro superior de 10 cm, inferior de 20 cm e altura de 30 cm é preenchido com a massa de concreto, da seguinte forma: em três camadas de altura aproximadamente iguais, com 25 golpes cada uma, com a haste de socamento durante o adensamento. Quando o cone estiver completamente preenchido, retira-se o molde lenta e verticalmente e mede-se a diferença entre a altura do tronco de cone e a altura do concreto assentado.

O ensaio possui limitações de precisão, porém apresenta importância técnica durante a fabricação da massa de concreto, pois fornece um parâmetro visual do grau de desagregação da mistura. Um operador experiente consegue informar, ao final do ensaio, se é necessário adicionar água, cimento ou areia e refazer a mistura a fim de obter a consistência requerida.

3.2.2 Ensaio de compressão

Após 28 dias da data de fabricação, três corpos-de-prova de argamassa de cimento e três de concreto, foram submetidos ao ensaio de compressão para determinação da resistência (NBR 5739, 2007 e NBR 7215, 1996). A figura 12 mostra um corpo de prova durante o ensaio. As medidas foram realizadas na UTFPR, campus Curitiba, sede Ecoville, no Laboratório de Prensas, cujo modelo operado foi DL30000 (capacidade 30 toneladas).

Uma vez colocado o corpo-de-prova na prensa hidráulica, esta aplica uma força com aumento gradual até o rompimento da amostra. A ruptura ocorre quando a magnitude da força diminui abruptamente, o que corresponde a uma diminuição de pelo menos 20%. Antes do ensaio, os corpos-de-prova foram encaixados entre dois anéis metálicos⁵ para promover um contato perfeito entre o corpo de prova e a prensa. A velocidade de aplicação de carga foi de 0,25 MPa/s para todas as amostras.

⁵ Anéis metálicos: algumas prensas hidráulicas já possuem os anéis metálicos acoplados aos pratos; outras, como a utilizada neste trabalho, possuem anéis removíveis.

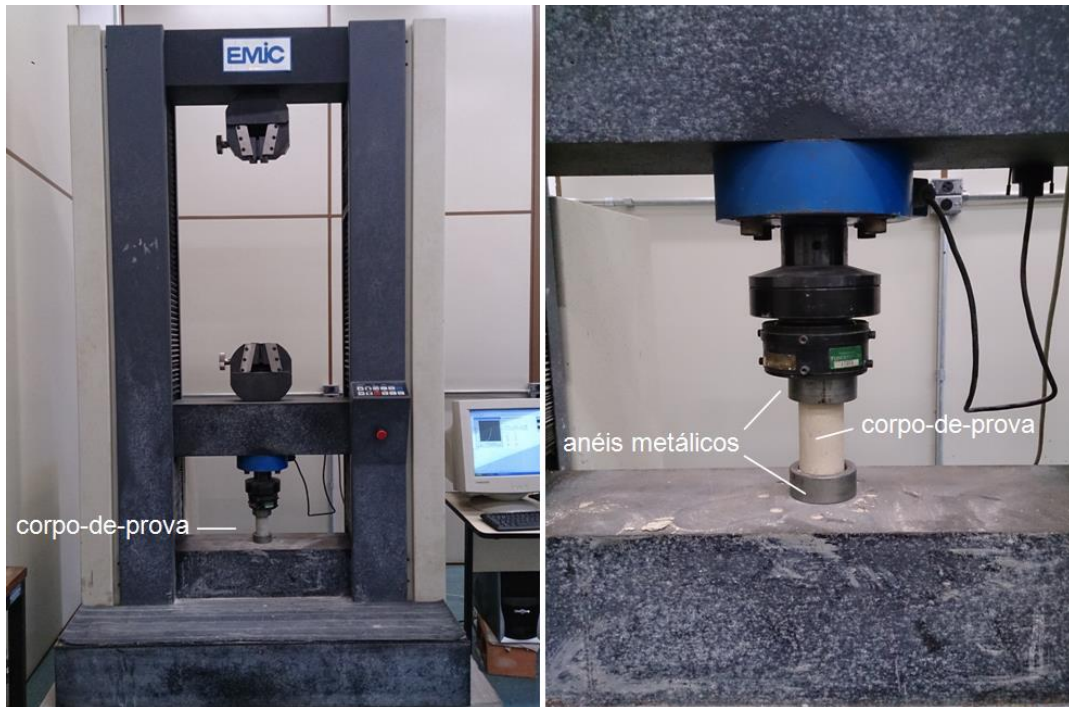


Figura 12 - Ensaio de compressão

Fonte: autoria própria

3.2.3 Permeabilidade ao ar

Medidas de permeabilidade ao ar foram realizadas com três corpos de prova de cada material. Para esta medição foi utilizado o porosímetro (*Poriscope Plus P-6050, James Instruments*).

O procedimento para medir a permeabilidade ao ar consiste na utilização do porosímetro e dos seguintes acessórios: uma mangueira grossa; uma mangueira fina; uma câmara de vácuo; uma bomba manual de vácuo. A bomba manual de vácuo é conectada ao porosímetro através da mangueira grossa e a câmara de vácuo através da mangueira fina. A figura 13 mostra uma medida sendo realizada.

O porosímetro possui duas lâmpadas indicadoras de pressão, uma delas se refere ao valor de -50 kPa e outra ao valor -55 kPa. Além disso, o equipamento possui uma válvula de vácuo que quando está aberta é utilizada para criar vácuo e quando está fechada serve para manter a pressão criada pela bomba manual.

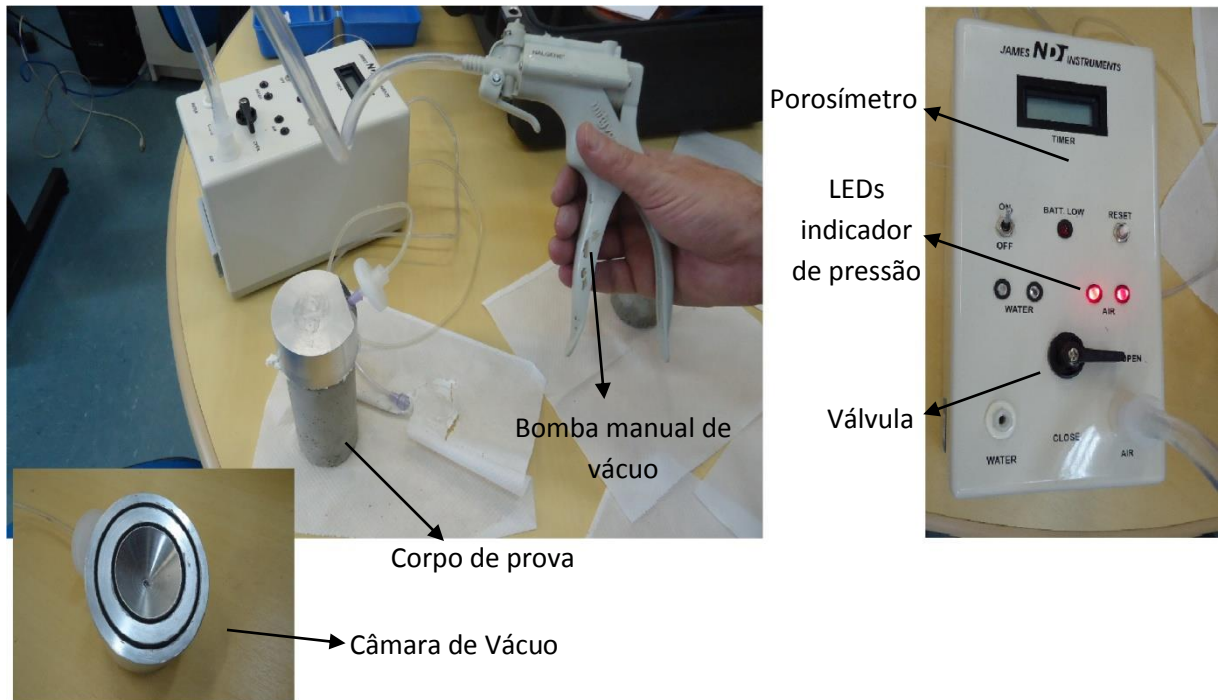


Figura 13 - Detalhamento em imagem da medição da permeabilidade ao ar

Fonte: Autoria própria

Primeiramente a câmara de vácuo foi posicionada na superfície do corpo de prova e vedada com silicone. Em seguida, o equipamento foi ligado e a válvula colocada na posição *open*. Neste momento, a bomba manual de vácuo foi utilizada para fazer a sucção do ar, com golpes lentos e estáveis, e reduzir a pressão dentro da câmara em pelo menos 55 kPa abaixo da pressão atmosférica. Durante este processo a lâmpada de -50 kPa acende por primeiro e em seguida a de -55 kPa. Então, quando as duas lâmpadas estavam acesas a válvula foi colocada na posição *close*.

A permeabilidade ao ar é calcula levando-se em conta o tempo que demora para a pressão aumentar em cinco kPa, de -55 kPa para -50 kPa, de acordo com a equação 3.1, fornecida pelo manual do equipamento (JAMES INSTRUMENTNS, 2015). Ou seja, leva-se um determinado tempo para o ar externo se infiltrar para dentro da câmara de vácuo, cuja pressão interna é menor do que a pressão atmosférica, o que faz com que a pressão aumente.

Desta forma, com a válvula colocada na posição *close* e as duas lâmpadas acesas, esperou-se um tempo até que a lâmpada de -55 kPa se apagasse. Neste exato momento o cronômetro é ligado. Quando a segunda lâmpada de -50 kPa se

apagou o cronômetro foi desligado. A medida do tempo foi realizada uma vez para cada um dos corpos de prova, três de concreto e três de argamassa de cimento.

Na equação 3.1 o tempo t é dado em segundos e o volume V em mililitros. O volume V refere-se ao volume do sistema (interior do equipamento e a câmara de vácuo), que no caso, é de 77,1 ml.

$$Per = 19,05 \cdot \left(\frac{t}{V}\right) = 0,247 \cdot t \quad \text{Eq. 3.1}$$

O tempo t é influenciado pela quantidade de água contida no concreto e na argamassa de cimento. Quanto maior for a umidade presente nos corpos de prova, maior será o tempo de permeabilidade.

3.2.4 Porosidade dos corpos de prova

A porosidade do concreto e da argamassa de cimento foi determinada a partir do método de absorção por imersão. Este método consiste em deixar os corpos de prova imersos em água por tempo suficiente para que absorvam a maior quantidade de água possível, em torno de quatro dias.

O procedimento para determinação da porosidade foi realizada depois de mais de oito meses após a fabricação dos corpos de prova. Deve-se tomar este cuidado, pois é importante que o material já tenha absorvido toda a quantidade de água que fora utilizada em sua fabricação. Assim, espera-se que a resistência já tenha atingido valor constante. A cura do concreto é de 28 dias, então, não é aconselhável determinar a porosidade pelo método de absorção por imersão antes deste tempo.

Com os corpos de prova completamente secos, suas massas M_{seca} foram mensuradas. Posteriormente, os materiais foram totalmente imersos em água por seis dias. Após este tempo, o excesso de água foi retirado com um pano e logo em seguida suas massas foram medidas, correspondendo ao valor da massa saturada $M_{saturada}$. Assim, a porosidade pode ser calculada de acordo com a equação 3.2, ou de acordo com a equação 3.3 que fornece o valor em porcentagem.

$$Poros = \frac{M_{saturada} - M_{seca}}{M_{seca}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$Porosidade = \frac{M_{saturada} - M_{seca}}{M_{seca}} \cdot 100\% \quad \text{Eq. 3.3}$$

Três corpos de prova de concreto e três de argamassa de cimento foram utilizados para realização do ensaio de absorção por imersão.

3.2.5 Espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF)

A técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva, EDXRF, baseia-se na medição das intensidades de raios X característicos emitidos por elementos químicos constituintes de uma amostra (GRIEKEN e MARCOWICZ, 2002). A EDXRF é utilizada para obtenção de informações qualitativas e quantitativas referentes a composição elementar de materiais de diversas naturezas (sólidas, líquidas, biológicas, geológicas, metálicas, cerâmica, entre outras). Esta técnica auxilia no estudo de caracterização de materiais sem a necessidade de destruir a amostra.

O método consiste no uso de um tubo de raios X e um detector, além do corpo-de-prova. A radiação ionizante produzida pelo tubo interage com o material que se deseja estudar e produz um espectro característico dos átomos da amostra. Este espectro permite identificar os elementos químicos presentes, através de fótons que são emitidos por meio do processo de produção de raios X característicos (GRIEKEN e MARCOWICZ, 2002).

A análise dos corpos-de-prova foi realizada na UTFPR, no Laboratório de EDXRF. O sistema tubo-detector foi montado numa placa fornecida pelo fabricante AMPTEK (2014) em que os ângulos entre o tubo e o detector são respeitados, conforme figura 14, que foi utilizada como referência para montagem experimental. O tubo, modelo Mini-X, possui alvo de ouro e colimador de 1 mm. O detector, modelo X-123SDD, é do tipo *silicone drift*.

Primeiramente o equipamento foi calibrado com o padrão metálico certificado fornecido pelo fabricante do equipamento de EDXRF. Os corpos de prova foram irradiados com tensão de 40 kV e corrente de 15 mA por 600 s.

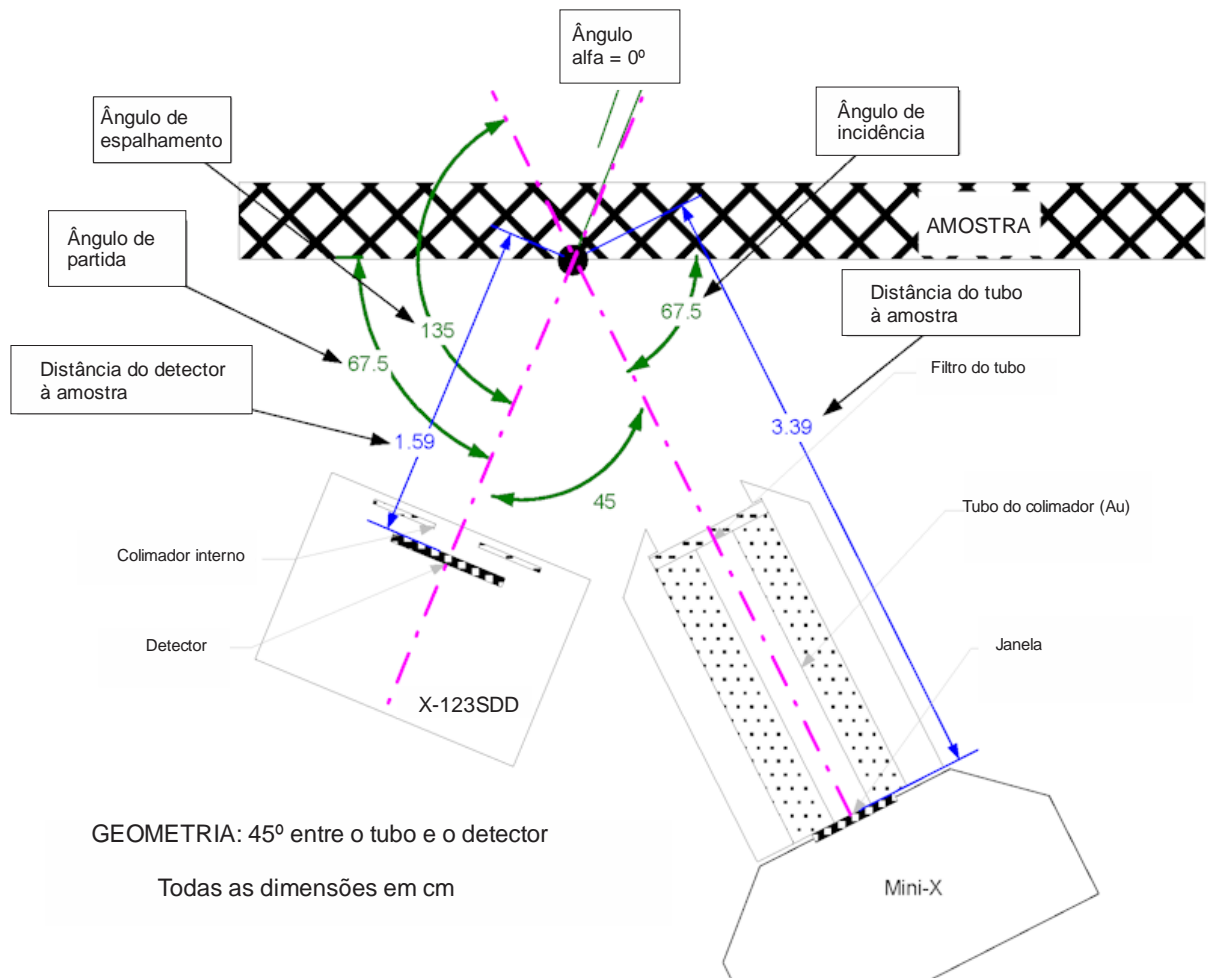


Figura 14 - Esquema da montagem experimental utilizada na EDXRF

Fonte: AMPTEK, 2015

3.2.6 Espectrometria gama

A técnica de espectrometria gama permite determinar a atividade dos principais radionuclídeos presentes nas amostras de material de construção. A medida foi realizada pela equipe especializada do CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte) por meio do espectrômetro gama Canberra, do tipo *High-Purity Germanium*, mostrado na figura 15.



Figura 15 - Espectrômetro gama Canberra

Fonte: LAOER, 2016

Alguns corpos de prova de concreto e de argamassa de cimento foram moídos em um moinho de bolas Solotest. Este equipamento é um cilindro metálico oco que rotaciona em torno do seu eixo axial de forma controlada. Dentro do cilindro foram colocados quatro corpos de prova de mesmo material juntamente com dez esferas maciças de metal. Durante a rotação do equipamento, as esferas colidem com o corpo de prova até que se obtenha material sólido triturado. O equipamento Solotest foi programado para realizar duas mil rotações. Tomou-se o cuidado de limpar o interior do cilindro antes de triturar os corpos de prova de outro material.

Um quilograma de concreto e um quilograma de argamassa de cimento, ambos em pó, foram enviados ao CDTN, para serem analisados. A equipe do CDTN embalou as amostras em frascos Marineli que foram deixados em repouso por pelo menos 30 dias afim de se obter o equilíbrio radioativo secular nas famílias do ^{238}U . Este tipo de frasco específico permite que a amostra fique mais próxima do detector dentro do equipamento.

O espectrômetro Canberra de geometria coaxial, possui detectores semicondutores de germânio que possibilitam a aquisição de espectro de radiação gama (CANBERRA, 2016). Além disso, o equipamento possui blindagem para atenuar a radiação externa. Em especial, no CDTN, o espectrômetro está localizado em um laboratório, de baixíssimo *background*, cercado por uma camada de água em todas as paredes, teto e piso, que reduz a radiação de origem cósmica e terrestre.

O resultado das medidas de espectrometria gama foi enviado pelo CDTN com relação aos radionuclídeos que são relevantes para este trabalho. A atividade específica (Bq/kg) do ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K foi mensurada e estes valores foram utilizados para o cálculo do rádio equivalente, do índice de concentração de atividade e do coeficiente de emanção por meio das Equações 2.8, 2.10 e 2.11.

3.3 Medição da taxa de exalação de radônio

Os corpos-de-prova de concreto e argamassa de cimento foram submetidos à medida da taxa de exalação de radônio de curta (48 horas) e longa duração (12 dias). Foram selecionadas oito amostras idênticas de cada tipo de material de construção e identificadas da seguinte maneira: A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 para argamassa de cimento e C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7 e C8 para concreto.

As medidas de curta duração foram realizadas com o intuito de comparar o modelo 3D e 1D para verificar se o aparato experimental é capaz de detectar diferença nos dados obtidos. Para tanto, estas medidas foram realizadas com corpos de prova em seu estado original, representando o modelo 3D, e com corpos de prova selados e envelopados, retratando o modelo 1D. Estes fazem com que o gás seja exalado apenas pelo topo, como mostra a figura 8, apresentada na fundamentação teórica desta dissertação.

É importante ressaltar que este trabalho tem como foco o modelo 1D, pois representa mais fielmente a exalação das paredes, do teto e do chão que formam o ambiente e contribuem para a concentração de radônio *indoor*. As medidas de longa duração foram realizadas com os corpos-de-prova selados e envelopados, representando o modelo 1D, e também com corpos de prova em seu estado original, representando o modelo 3D.

O aparato experimental foi constituído pelo equipamento de monitoração profissional *AlphaGuard*, corpos-de-prova em frasco de vidro, rotâmetro, vasos de segurança, bomba de ar (*AlphaPump*) e mangueiras. A figura 16 mostra a realização de uma medida da taxa de exalação de radônio e a figura 17 representa um esquema. Além disso, utilizou-se filtro de aspirador de pó para cobrir a superfície exaladora dos corpos de prova com o intuito de impedir que partículas de sujeira, provenientes do material de construção, entrassem na circulação de ar e contaminassem a câmara de ionização do *AlphaGuard*. Observa-se que este cuidado se deve principalmente ao

fato de que as partículas podem aderir nas paredes da câmara de ionização e interferir nas medidas.

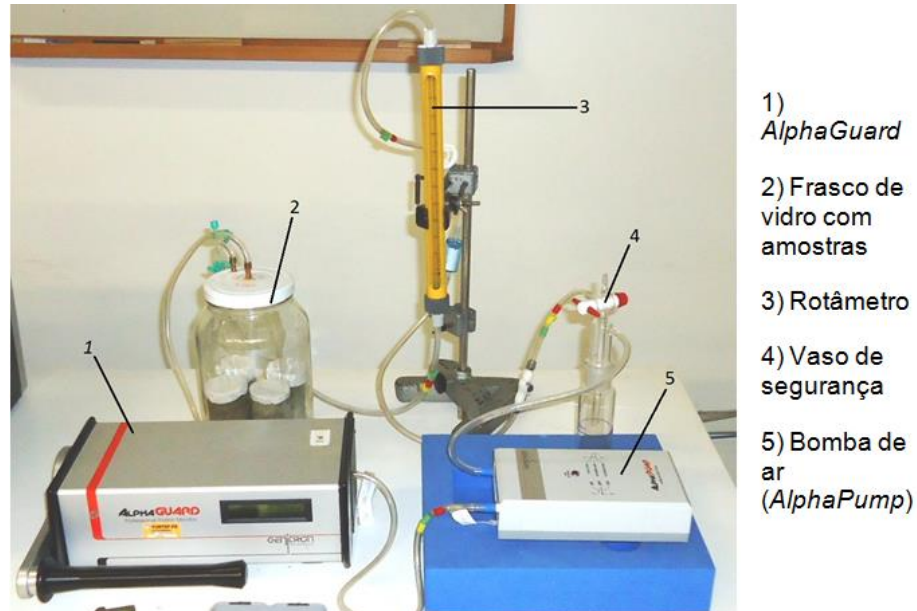


Figura 16 - Aparato Experimental para medida da taxa de exalação de radônio

Fonte: autoria própria

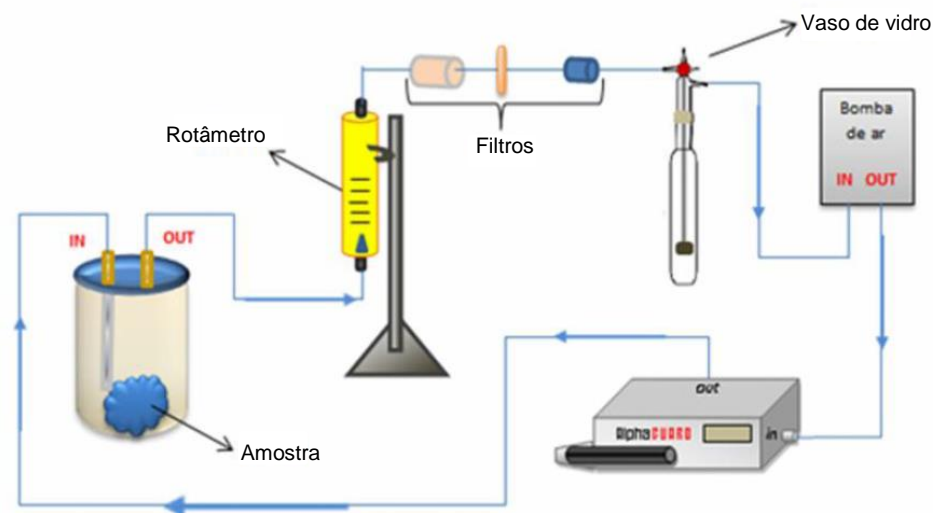


Figura 17 - esquema da montagem experimental para medida da taxa de exalação de radônio

Fonte: DEL CLARO, 2013

Antes das medidas da taxa de exalação de radônio dos materiais de construção, realizou-se medidas de *background*, que foram executadas sem os corpos-de-prova, porém com a quantidade de filtro necessária para embrulhar os

mesmos. Ou seja, esta medição obteve a concentração de radônio intrínseco ao sistema considerando a contribuição dos filtros.

Foi separada a quantidade de filtro necessária para embrulhar 4 corpos-de-prova iguais, e colocada no frasco de vidro para realização da medida de *background*. O equipamento AlphaGuard, configurado no modo 1 *minflow*, e seus acessórios, bem como o restante do material utilizado, foram conectados de acordo com o esquema apresentado na figura 14. O AlphaGuard foi ligado e aguardou-se o tempo de espera informado no visor. Imediatamente após esse período, a bomba de ar foi ligada, funcionando com uma taxa de 0,5 L/min. Após 1 hora a bomba e o *AlphaGuard* foram desligados, determinando o fim da medida de *background*.

Para a medida denominada curta-duração-modelo-3D, os corpos-de-prova foram embrulhados individualmente com filtro e colocados dentro do frasco de vidro. O AlphaGuard, configurado no modo 1 *minFlow*, foi ligado e aguardou-se o tempo de espera informado no visor. Imediatamente após esse período, a bomba de ar foi ligada, funcionando com uma taxa de 0,5 L/min. Após 48 horas a bomba e o AlphaGuard foram desligados. Esta medição foi repetida três vezes para cada tipo de material com os mesmos quatro corpos de provas (A5, A6, A7 e A8 para argamassa de cimento; C5, C6, C7 e C8 para concreto).

Para a medida denominada curta-duração-modelo-1D, os corpos-de-prova foram selados e envelopados como descrito no apêndice B. A superfície pela qual o gás pode sair foram embrulhadas individualmente com filtro. O AlphaGuard, configurado no modo 1 *minFlow*, foi ligado e aguardou-se o tempo de espera informado no visor. Imediatamente após esse período, a bomba de ar foi ligada, funcionando com uma taxa de 0,5 L/min. Após 48 horas a bomba e o AlphaGuard foram desligados. Esta medição foi repetida três vezes para cada tipo de material com os mesmos quatro corpos de provas (A1, A2, A3, A4 para argamassa de cimento; C1, C2, C3, C4 para concreto).

Para a medida denominada longa-duração-modelo-1D, os corpos-de-prova foram selados e envelopados como descrito no apêndice C. A superfície pela qual o gás pode sair foram embrulhadas individualmente com filtro. O AlphaGuard, configurado no modo 10 *minFlow*, foi ligado e aguardou-se o tempo de espera informado no visor. Imediatamente após esse período, a bomba de ar foi ligada, funcionando com uma taxa de 0,5 L/min. Após 12 dias a bomba e o AlphaGuard foram desligados. Esta medição foi realizada apenas uma vez para cada tipo de material

com quatro corpos de provas (A5, A6, A7 e A8 para argamassa de cimento; C5, C6, C7 e C8 para concreto).

Para a medida denominada longa-duração-modelo-3D, os corpos de prova foram embrulhados individualmente com filtro e colocados dentro do frasco de vidro. O AlphaGuard, configurado no modo 10 *minFlow*, foi ligado e aguardou-se o tempo de espera informado no visor. Imediatamente após esse período, a bomba de ar foi ligada, funcionando com uma taxa de 0,5 L/min. Após 12 dias a bomba e o AlphaGuard foram desligados. Esta medição foi realizada apenas uma vez para cada tipo de material com quatro corpos de provas (A1, A2, A3, A4 para argamassa de cimento; C1, C2, C3, C4 para concreto).

Os apêndices A, B e C apresentam o roteiro prático e técnico de como realizar as medidas descritas nesse tópico.

3.4 Medição da concentração de radônio em materiais de construção

O equipamento AlphaGuard mede a concentração de radônio *indoor*, em águas, em solo e em sistemas com circulação de ar fechado. No item 3.3 a taxa de exalação é inferida a partir do monitoramento do crescimento desse valor com o tempo. Para medir a concentração de radônio em materiais de construção com o AlphaGuard é necessário estabelecer um estado de equilíbrio secular entre o nuclídeo pai, ^{226}Ra , e o nuclídeo filho, ^{222}Rn .

O procedimento utilizado neste item é muito similar ao apresentado no anterior. Quatro corpos-de-prova são utilizados por vez. Optou-se por escolher aqueles em seu estado original, ou seja, sem estar selados ou envelopados. Os corpos-de-prova escolhidos são: A5, A6, A7 e A8 para argamassa de cimento; C5, C6, C7 e C8 para concreto; as medidas foram feitas individualmente para cada tipo de material de construção. O aparato experimental é o mesmo apresentado na figura 16.

Quatro frascos de vidro foram preparados. Três com os corpos-de-prova; um apenas com a quantidade de filtro utilizado para envolver as amostras e impedir que partículas de sujeira entrem no sistema de circulação de ar e cheguem à câmara de ionização do AlphaGuard. Os frascos ficaram fechados, sem entrar em contato com o ambiente externo, por 40 dias para que o estado de equilíbrio secular fosse atingido.

A medida consiste de três etapas: ventilação, para reduzir e garantir que a concentração intrínseca do equipamento seja a mais baixa possível; medida de

background, para medir a concentração de radônio intrínseca do sistema; e medida das amostras, para obter o que se deseja investigar.

Na etapa de ventilação a bomba de ar, conectada ao AlphaGuard, permanece ligada por 60 minutos. Aquele não precisa, necessariamente, estar ligado, pois neste momento deseja-se fazer uma preparação para a próxima etapa. Conforme mostra a figura 15, a ventilação é aberta, com o objetivo de renovar o ar do sistema. Um filtro é utilizado na entrada de ar para impedir que partículas de poeira entrem no equipamento.

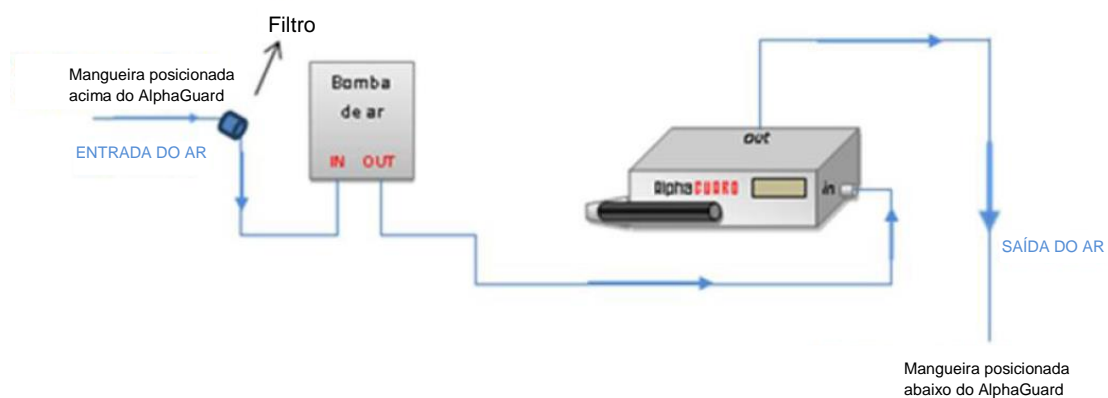


Figura 18 - Montagem experimental para ventilação do AlphaGuard

Fonte: DEL CLARO, 2013

A segunda etapa, medição de *background*, foi realizada exatamente igual à descrita no item 3.3, cuja explicação também pode ser encontrada no apêndice A, representada esquematicamente pela figura 18. O frasco de vidro contendo apenas os filtros foi avaliado e a duração da medida foi de 60 minutos.

Os frascos de vidro contendo as amostras de material de construção foram utilizados para realização da terceira etapa, um por vez. Assim, após a avaliação do *background*, o frasco foi substituído e o procedimento seguiu de acordo com o apresentado no apêndice A e descrito no item 3.3. Todavia, a medida teve duração de 120 minutos.

3.5 Medição de concentração de radônio *indoor*

Para determinar a contribuição da exalação de radônio na concentração indoor foi utilizada a célula-teste descrita no item 3.1.3. Após 28 dias da fabricação da célula-teste, foram instaladas 10 câmaras de difusão, cujo modelo é descrito detalhadamente no trabalho de Urban e Piesch (1981). Trata-se de uma câmara feita de fibra de

carbono de alta condutividade elétrica, que diminui o acúmulo de produtos de decaimento do radônio no detector, uma vez que tendem a ficar aderidos à parede da câmara.

O elemento ativo das câmaras de difusão utilizadas foi o detector CR-39 (Columbia Resin #39). Da família de detectores do estado sólido SSNTD (*Solid State Nuclear Track Detectors*), o CR-39 é sensível à partículas α . Esse sistema câmara-detector foi escolhido por ser amplamente utilizado em medições indoor, assim como, pela disponibilidade do uso fornecida pelo Laboratório de Pesquisa de Radiações Ionizantes da UTFPR. Ao se submeter o CR-39 a um ataque químico com NaOH, os danos ou traços causados pela partícula α podem ser observados por meio de um microscópio ótico.

Os detectores CR-39, de área de exposição de 1 cm² foram alocados dentro das câmaras de difusão, que por sua vez, foram instaladas no interior da célula-teste por 21 dias. Houve o controle de *background* do ambiente externo à célula-teste por meio de três detectores.

Na figura 19 é possível observar os materiais utilizados na medição de concentração de radônio da célula-teste. Como detalhamento do sistema, observa-se a câmara, de volume sensível de 7,1 cm³, com tampa vazada para a passagem de ar. O filtro utilizado na entrada é de microfibra de vidro GF52/C que impede a entrada de partículas indesejáveis. O detector CR-39, de área de exposição de 1 cm², é preso à tampa com o auxílio de um encaixe em forma de anel.



Figura 19 - Câmara desmontada utilizada na medição de concentração de radônio em ambientes indoor

Fonte: CORRÊA, 2012

Como o intuito é obter dados da concentração *indoor* proveniente apenas do concreto da célula-teste, esta ficou em uma sala arejada no terceiro andar de um edifício da

UTFPR. Isto garante que a contribuição do radônio proveniente do solo na concentração indoor seja reduzida drasticamente. Afim de garantir dados mais exatos, três detectores de controle foram instalados no ambiente externo ao protótipo com o intuito de se determinar a concentração de radônio existente no local, sem a contribuição do concreto.

Dos sete detectores instalados no interior da célula-teste, três foram colocados no piso da célula, dois foram pendurados de tal forma que ficassem no meio do cubo e os dois próximos à tampa. Assim, espera-se que os valores encontrados sejam representativos da média de concentração de ^{222}Rn *indoor* na célula-teste.

Os detectores foram revelados em solução de NaOH 6,25M e 2% em volume de etanol, por 14h, em banho-maria na temperatura de 70°C. Os traços obtidos foram contabilizados e usados para o cálculo da concentração média de radônio.

A metodologia de calibração desenvolvida pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR em conjunto com o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia nuclear (CDTN) e a partir de exposição prévia de câmaras e detectores expostos no NIRS (National Institute of Radiological Sciences) propiciou o desenvolvimento de uma equação para cálculo da concentração de radônio a partir do número de traços nos detectores (CORRÊA, 2011). A Equação 3.1 fornece a concentração C de radônio em Bq/m^3 , onde n é o número de traços/hora de exposição em 1 cm^2 do detector.

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

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultado dos ensaios de compressão

O ensaio de compressão caracterizou o material no sentido de verificar sua condição de uso, em termos gerais, em construções (ambientes *indoor*). O apêndice D apresenta gráficos para um corpo de prova de argamassa e um corpo de prova de concreto obtidos neste trabalho, com o intuito de ilustrar como a tensão se comporta em função da deformação. Os valores da resistência relacionada à tensão de ruptura foram fornecidos pelo próprio equipamento utilizado para realização da medição para cada um dos corpos de prova, conforme tabelas 13 e 14.

A força máxima de compressão é determinada quando ocorre a ruptura do corpo de prova. A tensão leva em conta a área da seção transversal do corpo de prova padrão, que neste caso é de 19,63 cm². Pode-se observar nas figuras 25 e 26, no apêndice D, um gráfico de quando a ruptura acontece. Em um dos ensaios realizados com o concreto, o corpo de prova rompeu-se quando a deformação atingiu aproximadamente 7,5 mm e com a argamassa de cimento, aproximadamente 9,2 mm.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de compressão dos corpos de prova de argamassa de cimento

Argamassa			
Corpo de prova	Força Máxima (N)	Força Máxima (kgf)	Tensão (MPa)
1	61535,1	6274,86	31,34
2	56664,91	5778,23	28,86
3	78174,08	7971,57	39,81
4	81929,65	8354,53	41,73
5	77009,25	7852,79	39,22
6	36682,07	3740,54	18,68

Tabela 14 - Resultado do ensaio de compressão dos corpos de prova de concreto

Concreto			
Corpo de prova	Força Máxima (N)	Força Máxima (kgf)	Tensão (MPa)
1	47034,99	4796,25	23,95
2	49234,11	5020,5	25,07
3	57889,99	5903,16	29,48
4	49274,27	5024,6	25,1
5	50047,48	5103,44	25,49
6	49475,11	5045,08	25,2

A tabela 15 apresenta o resultado final do ensaio de compressão para os materiais utilizados neste trabalho. Os valores da força máxima e da tensão foram obtidos através da média e seus respectivos erros foram calculados por meio do desvio padrão do valor médio corrigido com o valor de Student para cinco graus de liberdade ($t=1,111$).

Tabela 15 - Resultado da resistência a compressão do concreto e da argamassa de cimento

	Argamassa de cimento	Concreto
Força máxima (N)	65300 ± 7800	50500 ± 1700
Força máxima (kgf)	6660 ± 800	5150 ± 170
Tensão (Mpa)	33 ± 4	25,7 ± 0,9

Os corpos de prova de argamassa de cimento apresentaram valores de resistência à compressão maiores que os de concreto, a diferença entre os valores de tensão é de $7,3 \pm 4,1$ MPa. De fato, já era de se esperar que o material com mais cimento fosse mais resistente para corpos de dimensões reduzidas, como é o caso de corpos de prova, onde as questões relacionadas às contrações (trincas) ficam reduzidas.

Os resultados de resistência à compressão obtidos evidenciaram que o material é condizente com o uso na construção civil em ambiente de convívio humano (PETRUCCI, 1975).

4.2 Resultado da permeabilidade ao ar

Os ensaios de permeabilidade do ar foram feitos com o intuito de verificar a possibilidade de difusão do radônio no material. As medidas de tempo referente à permeabilidade ao ar do concreto e da argamassa de cimento estão apresentadas na tabela 16.

Para o cálculo da permeabilidade ao ar a equação 3.1 foi utilizada. O resultado está apresentado na tabela 17, a seguir. Como foi feita apenas uma medida para cada corpo de prova, foi determinada a permeabilidade para cada um deles e em seguida a média foi calculada. Os erros foram calculados de acordo com o desvio padrão do valor médio corrigido pelo fato de Student para dois graus de liberdade ($t=1,321$).

Tabela 16 - Valores do tempo referente à permeabilidade ao ar do concreto e da argamassa de cimento

Material	Corpo de prova	Tempo (segundos)
Concreto	1	3,81
	2	6,40
	3	6,09
Argamassa de cimento	1	1,50
	2	8,47
	3	4,75

Tabela 17 - Resultado da permeabilidade ao ar dos corpos de prova de concreto e de argamassa de cimento

Material	Permeabilidade ao ar (s/ml)
Concreto	$1,3 \pm 0,3$
Argamassa de cimento	$1,2 \pm 0,7$

Devido às incertezas associadas aos valores de permeabilidade do concreto e da argamassa de cimento não é possível dizer qual dos dois materiais é mais permeável ao ar, neste caso só pode-se dizer que não há diferença estatística entre eles, já que o erro da diferença é evidentemente muito maior que a própria diferença. Os resultados mostram que há evidência de que os corpos de prova são permeáveis ao ar, portanto, o fenômeno de exalação é esperado.

4.3 Resultado da porosidade

Os ensaios de porosidade do material foram feitos também com o intuito de verificar a possibilidade de difusão do radônio no material. A tabela 18 apresenta os valores de massa dos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção por imersão para determinação da porosidade do concreto e da argamassa de cimento. O valor da porosidade foi calculado de acordo com as equações 3.2 e 3.3 e está contido na tabela 19.

Os corpos de prova de concreto apresentam valores de porosidade maiores que os corpos de prova de argamassa de cimento, já que o erro associado à diferença é menor que a própria diferença entre eles.

Tabela 18 - Valores de massa dos corpos de prova utilizados no ensaio de absorção por imersão

Material	Corpo de prova	Massa seca (g)	Massa saturada (g)
Concreto	1	440,21	463,64
	2	443,97	466,87
	3	436,84	458,45
Argamassa de cimento	1	425,31	441,17
	2	427,83	443,85
	3	416,89	437,66

Tabela 19 - Porosidade do concreto e da argamassa de cimento

Material	Porosidade	Porosidade (%)
Concreto	$0,0514 \pm 0,0014$	$5,14 \pm 0,14$
Argamassa de cimento	$0,0415 \pm 0,0055$	$4,15 \pm 0,55$

4.4 Resultado da análise qualitativa de EDXRF

A caracterização elementar realizada pelo equipamento de EDXRF da Amptek mostra que os corpos de prova e de argamassa de cimento e de concreto apresentam resultados similares. Isto viabiliza a comparação dos parâmetros de exalação deste trabalho. Os dados experimentais desta análise foram utilizados para a construção do espectro de emissão, elaborado pelo programa OriginPro 8. As figuras 20, 21, 22 e 23 mostram os picos dos elementos presentes nos materiais analisados.

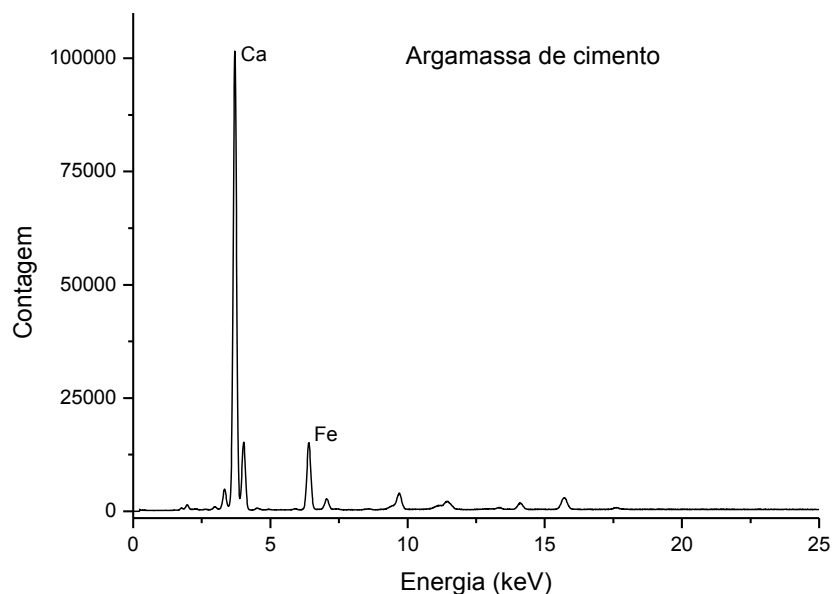


Figura 20 - Espectro de emissão do corpo de prova de argamassa de cimento

Fonte: autoria própria

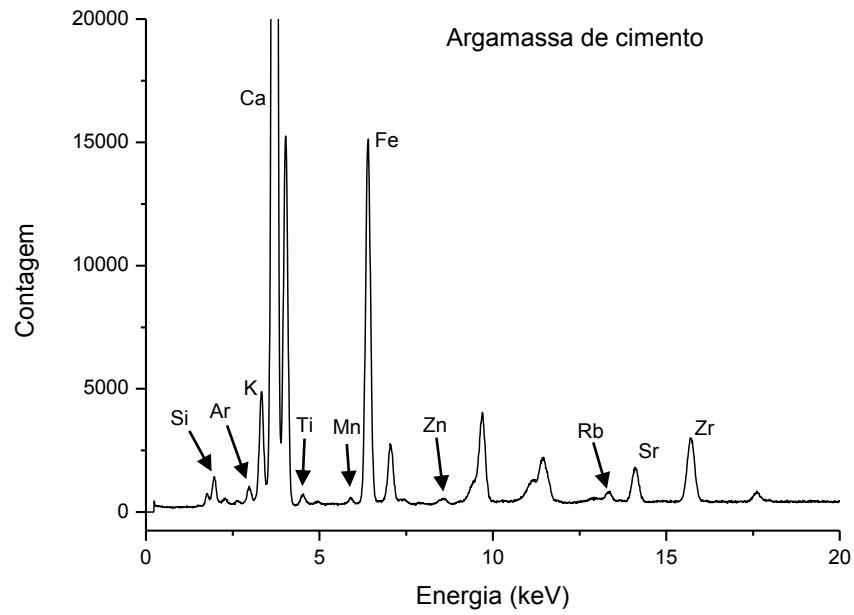


Figura 21 - Espectro de emissão do corpo de prova de argamassa de cimento
Fonte: autoria própria

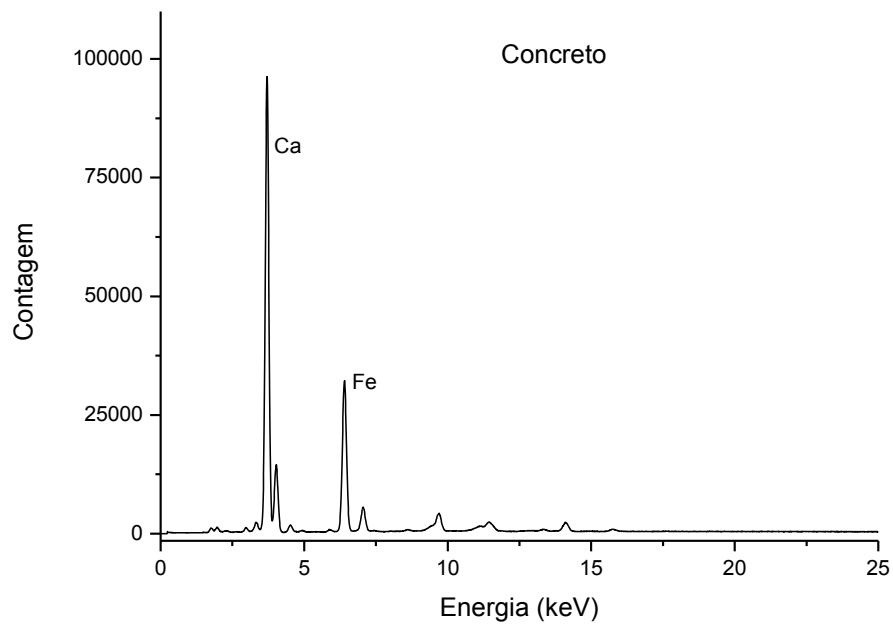


Figura 22 - Espectro de emissão do corpo de prova de concreto
Fonte: autoria própria

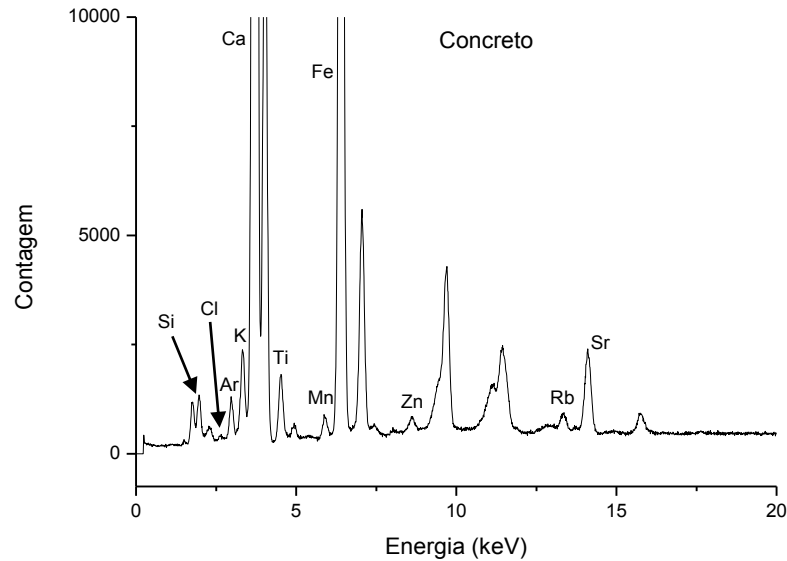


Figura 23 - Espectro de emissão do corpo de prova de concreto

Fonte: autoria própria

As figuras 21 e 23, mostram mais detalhadamente os elementos que constituem os corpos de prova. Para verificar qual elemento corresponde a um determinado pico, utilizou-se os dados da tabela 20, que fornece as energias de transição $K\alpha$ e $K\beta$ de cada elemento. Alguns picos de emissão não estão identificados por se tratar das emissões $K\beta$ dos elementos encontrados. Somente as emissões $K\alpha$ foram identificadas nas figuras.

Tabela 20 - Valores de energia de transição dos elementos encontrados no concreto e na argamassa de cimento (NUCLEAR DATA, 2015)

Elemento	Energia da Transição $K\alpha$ (keV)	Energia da Transição $K\beta$ (keV)
Al	1,487	1,554
Si	1,740	1,836
Cl	2,622	2,816
Ar	2,957	3,190
K	3,314	3,590
Ca	3,692	4,013
Ti	4,511	4,932
Mn	5,899	6,490
Fe	6,404	7,058
Zn	8,639	9,572
Rb	13,395	14,961
Sr	14,165	15,836
Zr	15,775	17,667

Ambos possuem Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Rb e Sr em sua composição. Além disso, apenas a argamassa de cimento contém Zr e apenas o concreto contém Cl. Com relação aos elementos encontrados nas amostras, pode-se afirmar que o argônio, por ser um gás, está presente no ambiente. Portanto, o argônio não faz parte, provavelmente a alguma das amostras em específico.

4.5 Resultado da análise de espectrometria gama

A tabela 21 mostra o resultado dos valores das atividades dos radionuclídeos. A atividade específica do ^{232}Th , apresentada na tabela 22, foi obtida considerando-se os valores de atividade do ^{224}Ra e do ^{228}Ac . Considerando que o ^{232}Th está em equilíbrio secular com seus filhos (^{212}Pb e ^{228}Ac), sua atividade pode ser calculada através da média das atividades dos filhos e erros associados.

Tabela 21 - Resultado da análise de espectrometria gama

Atividade Específica (Bq/kg)					
Amostra	Série ^{238}U		Série ^{232}Th		^{40}K
	^{214}Pb	^{214}Bi (^{226}Ra)	^{212}Pb (^{224}Ra)	^{228}Ac	
Concreto	14,9 ± 0,2	13,8 ± 0,2	29,8 ± 0,2	29,5 ± 0,5	434,5 ± 3,5
Argamassa de cimento	12,8 ± 0,2	12,6 ± 0,2	29,7 ± 0,2	29,2 ± 0,5	361,8 ± 3,5

Tabela 22 - Atividade específica do tório no concreto e na argamassa de cimento

Amostra	Atividade Específica do ^{232}Th (Bq/kg)
Concreto	29,7 ± 0,2
Argamassa de cimento	29,6 ± 0,2

A equação 2.7 foi utilizada para o cálculo do índice de concentração de atividade dos materiais, apresentado na tabela 23. A Equação 2.8 e os dados contidos nas Tabelas 21 e 22 foram utilizados para o cálculo da atividade de rádio equivalente, cujo valor está apresentado na tabela 24.

Tabela 23 - Resultado do índice de concentração de atividade dos materiais

Amostra	Índice de concentração de atividade
Concreto	0,3395 ± 0,0017
Argamassa de cimento	0,3106 ± 0,0017

Tabela 24 - Atividade de rádio equivalente do concreto e da argamassa de cimento

Amostra	Atividade de Rádio Equivalente (Bq/kg)
Concreto	89,8 ± 0,4
Argamassa de cimento	82,8 ± 0,4

Mesmo considerando as incertezas, os valores de I (tabela 23) não ultrapassam o valor de 0,5 recomendado pela *European Commission* (1999) referente à dose efetiva anual de 0,3 mSv/a. Da mesma forma, tais valores encontram-se abaixo do limite de uma unidade quando é considerado o critério de dose efetiva anual de 1 mSv/a.

O concreto possui maior atividade de rádio equivalente do que a argamassa de cimento, a diferença entre os valores é de $7 \pm 0,6$ Bq/kg. No entanto, ambos os materiais possuem atividade de rádio equivalente (tabela 24) abaixo do valor máximo admissível pela Unsear (2000), de 370 Bq/kg.

4.6 Resultado das medidas da taxa de exalação de radônio

A equação 2.6 foi reescrita considerando a relação entre a constante de decaimento λ e a meia-vida $T_{1/2}$, o que resulta na equação 4.1.

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

$$C(t) = Ci \cdot e^{-\left(\frac{\ln(2)}{T_{1/2}}\right) \cdot t} + \frac{E \cdot T_{1/2}}{V \cdot \ln 2} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\ln(2)}{T_{1/2}}\right) \cdot t}\right) \quad \text{Eq. 4.1}$$

A curva representada pela Equação 4.1 foi ajustada aos dados experimentais obtidos pelo equipamento AlphaGuard durante a medida da taxa de exalação do radônio. O volume livre V da montagem experimental utilizada é de $3,33 \cdot 10^{-3}$ m³. O ajuste foi feito pelo programa OriginPro 8. Primeiramente, a taxa de decaimento utilizada para o ajuste foi aquela que leva em conta a meia-vida do ²²²Rn de 3,8 dias (91,2 horas), representada pela curva vermelha na figura 24.

Observa-se que a curva vermelha (equação 4.1) não concorda com dados experimentais e mostra que o equilíbrio deveria acontecer mais tarde do que o que foi obtido (patamar). A mesma curva indica que o aumento da concentração deveria

continuar a crescer. Isto significa que ou há vazamento de gás ou que o tempo característico de decaimento (medido na prática e descrito a seguir) não é 3,8 dias. Isto pode ocorrer devido ao tempo que o elemento leva para sair do material e ser detectado no sistema. Como não há vazamento de gás, a segunda hipótese foi tomada como a mais adequada.

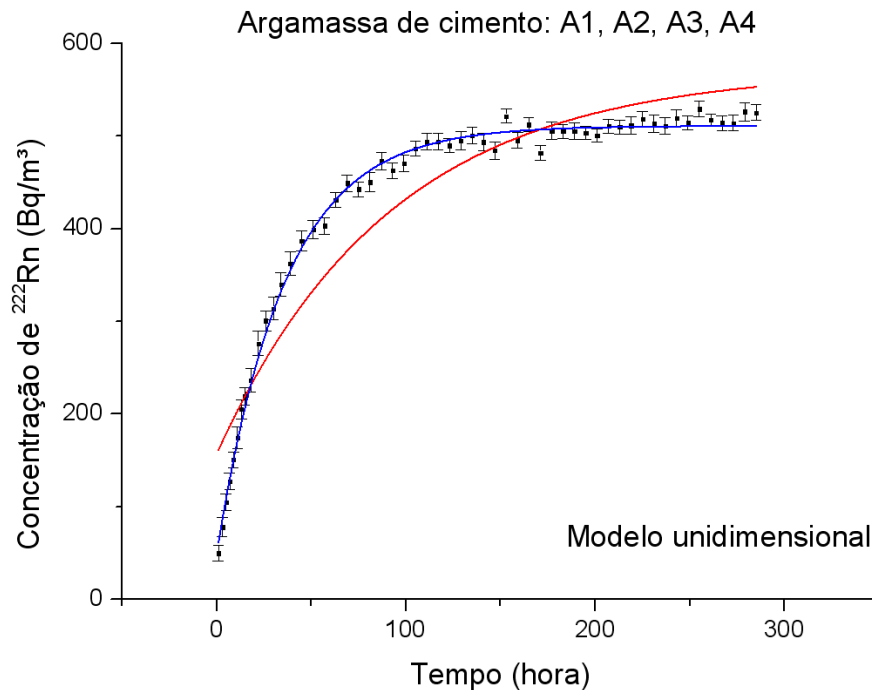


Figura 24 – Gráfico de comparação entre as curvas da taxa de exalação de radônio

Fonte: autoria própria

Para resolver este problema a equação 4.1 foi alterada de acordo com a equação 4.2. A grandeza utilizada para o ajuste, inicialmente a meia-vida ($T_{1/2}$), foi substituída por uma nova grandeza denominada “tempo característico de decaimento”, agora representada pela letra G , que foi tomada como parâmetro de ajuste. Desta forma, obteve-se a curva azul representada na figura 24. Pode-se observar, nesta mesma figura, que a Equação 4.2 é mais adequada aos dados experimentais. Caso o ajuste forneça um valor para G menor que 91,2 horas, significa que, em média, o radônio demora um certo tempo para ser exalado, o que comprova a hipótese de que o tempo característico de decaimento não é de 3,8 dias.

$$C(t) = Ci \cdot e^{-\left(\frac{\ln(2)}{G}\right) \cdot t} + \frac{E \cdot G}{V \cdot \ln 2} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\ln(2)}{G}\right) \cdot t}\right) \quad \text{Eq. 4.2}$$

É importante ressaltar que a meia-vida é uma grandeza muito bem estabelecida. Alguns valores de meia vida estão apresentados nas tabelas 3, 4 e 5. Do ponto de vista experimental, o tempo característico de decaimento G dá a informação de quanto tempo, em média, os átomos de radônio demoram para sair do corpo de prova, chamado de tempo de exalação $T_{exalação}$, ou seja, $T_{1/2} = G + T_{exalação}$.

Os gráficos da concentração de radônio em função do tempo referentes a cada medida estão apresentados nas figuras 25 a 42. A curva, equação 4.2, foi ajustada pelo programa computacional OriginPro 8 que forneceu a concentração inicial C_i , a taxa de exalação E e o tempo característico de decaimento G do ^{222}Rn de acordo com a relação $\lambda = \frac{\ln(2)}{G}$. Nos gráficos a seguir, C_i está apresentado em $[\text{Bq}/\text{m}^3]$, E em $[\text{Bq}/\text{h}]$ e G em $[\text{h}]$.

Medidas da taxa de exalação dos corpos de prova de concreto:

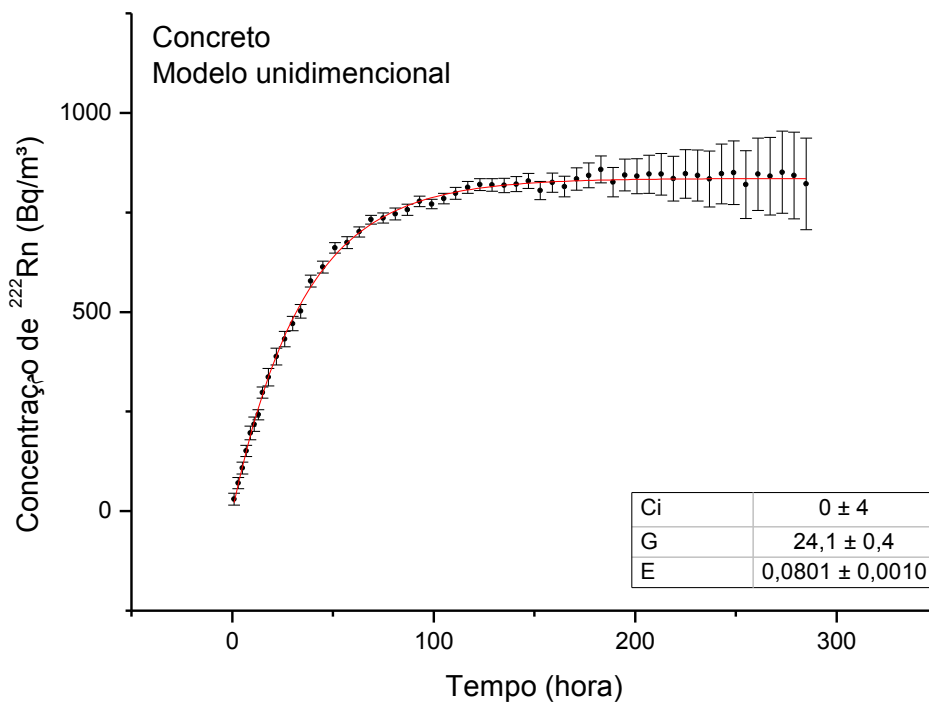


Figura 25 – Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 1

Fonte: autoria própria

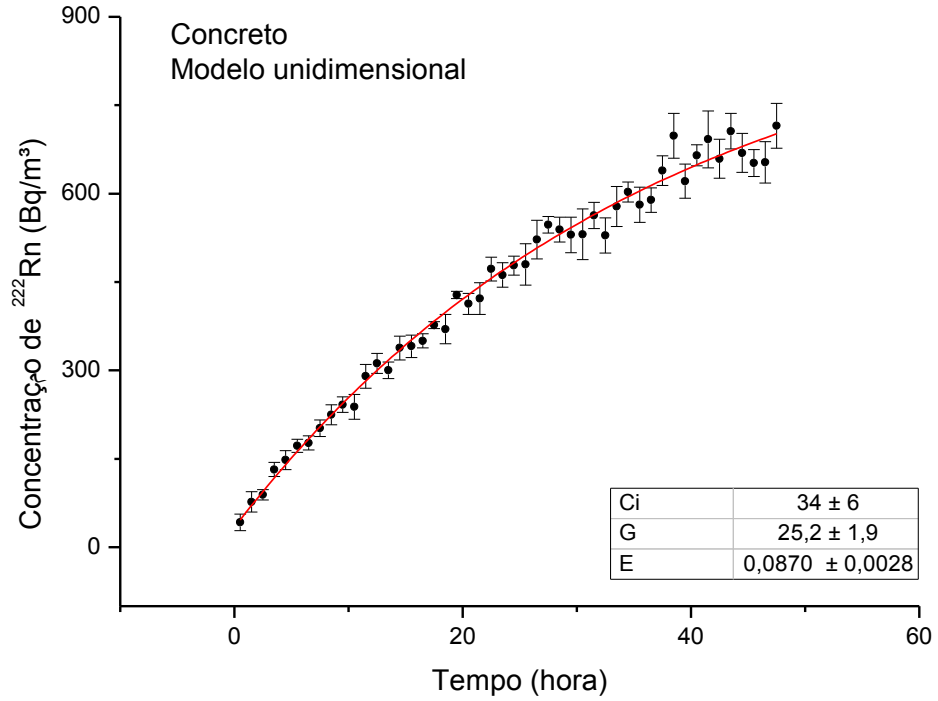


Figura 26 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 2

Fonte: autoria própria

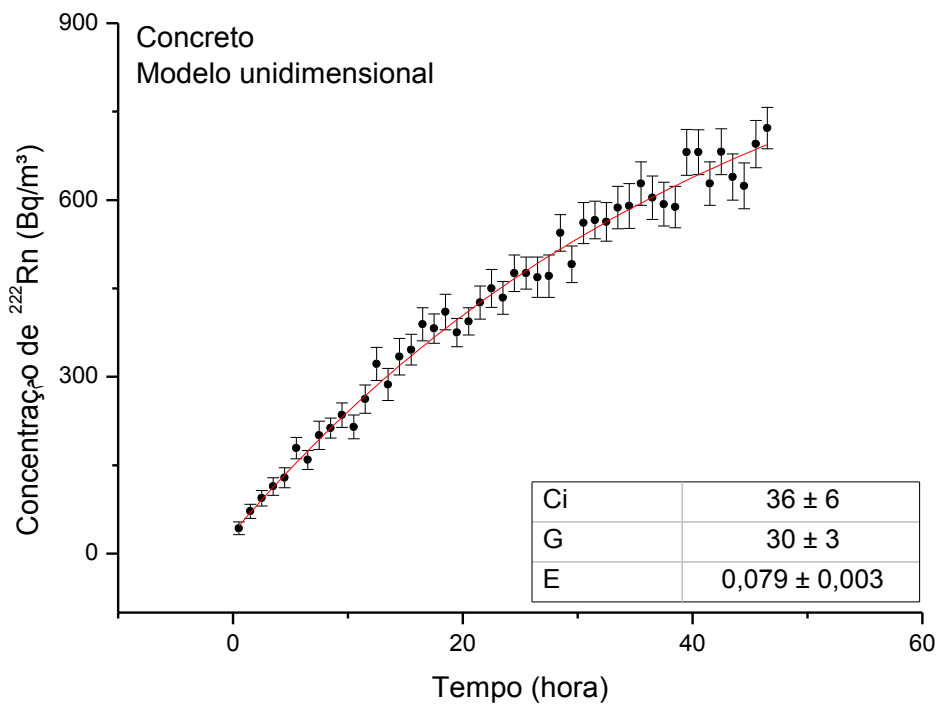


Figura 27 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 3

Fonte: autoria própria

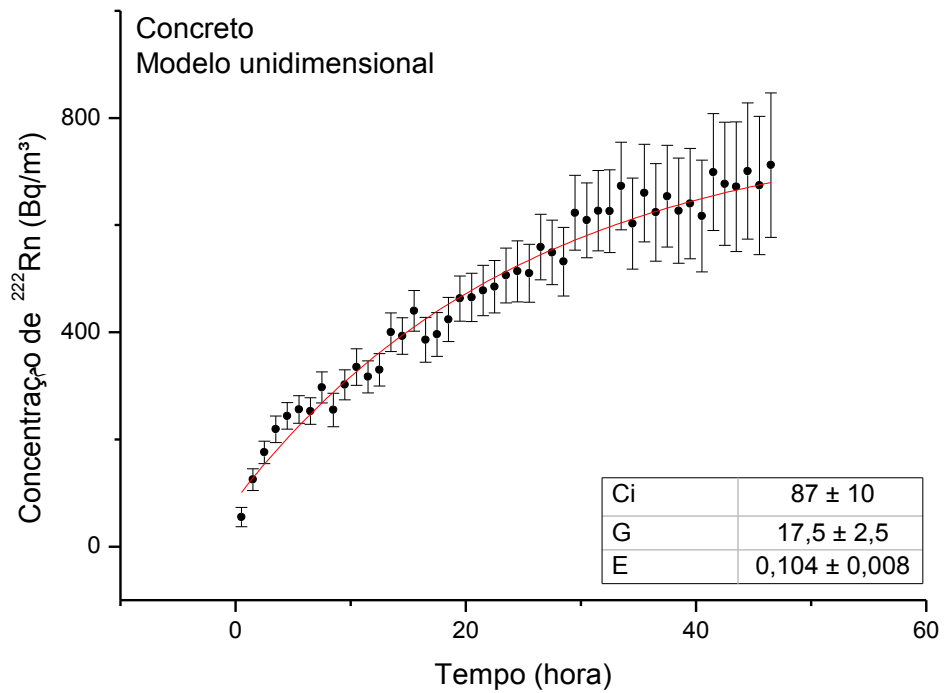


Figura 28 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 4

Fonte: autoria própria

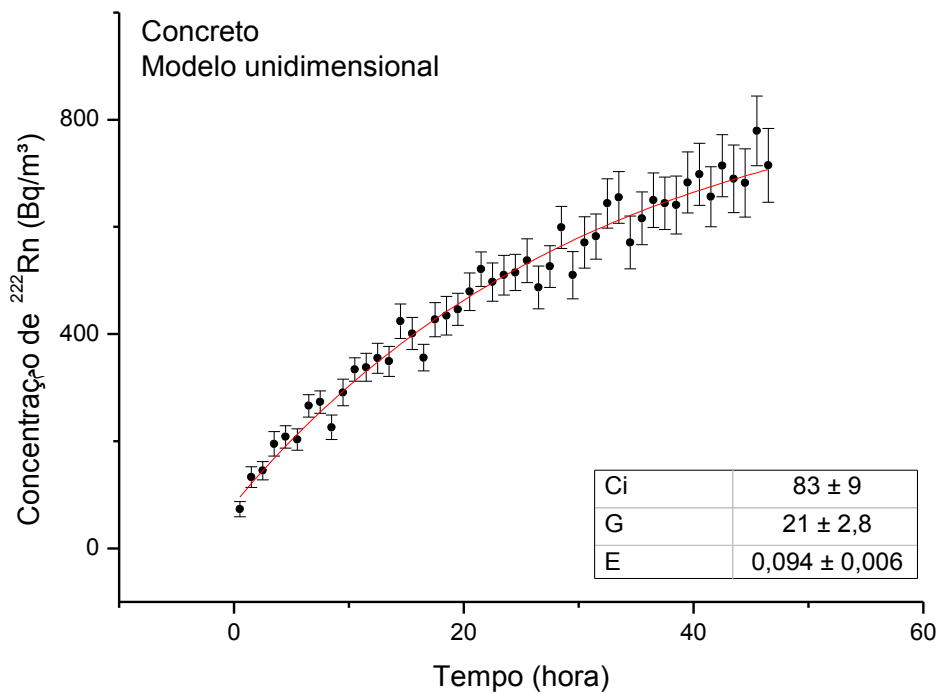


Figura 29 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 5

Fonte: autoria própria

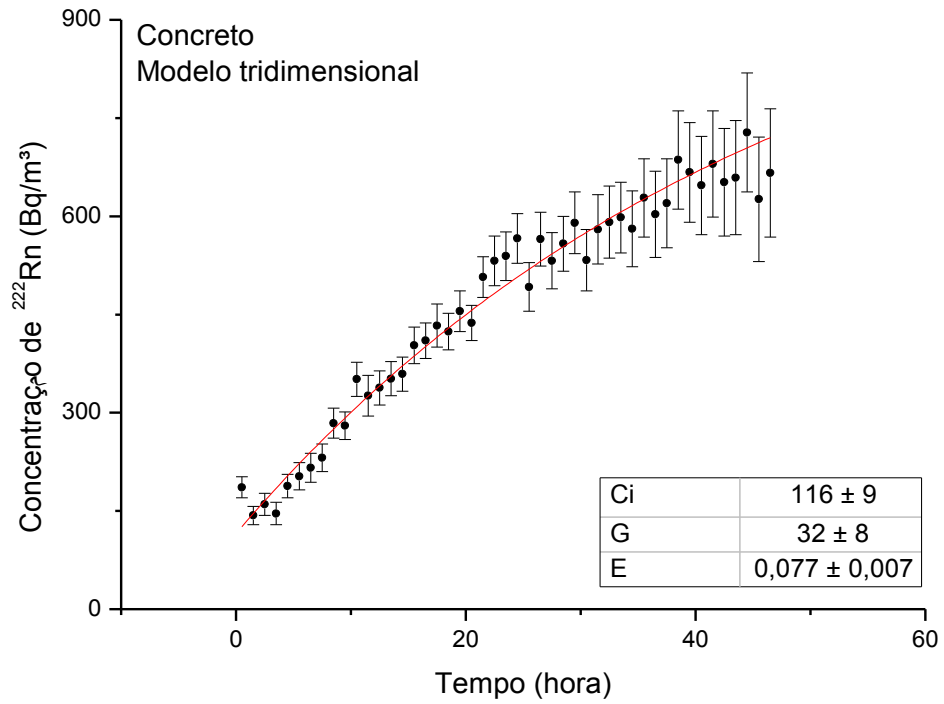


Figura 30 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 6

Fonte: autoria própria

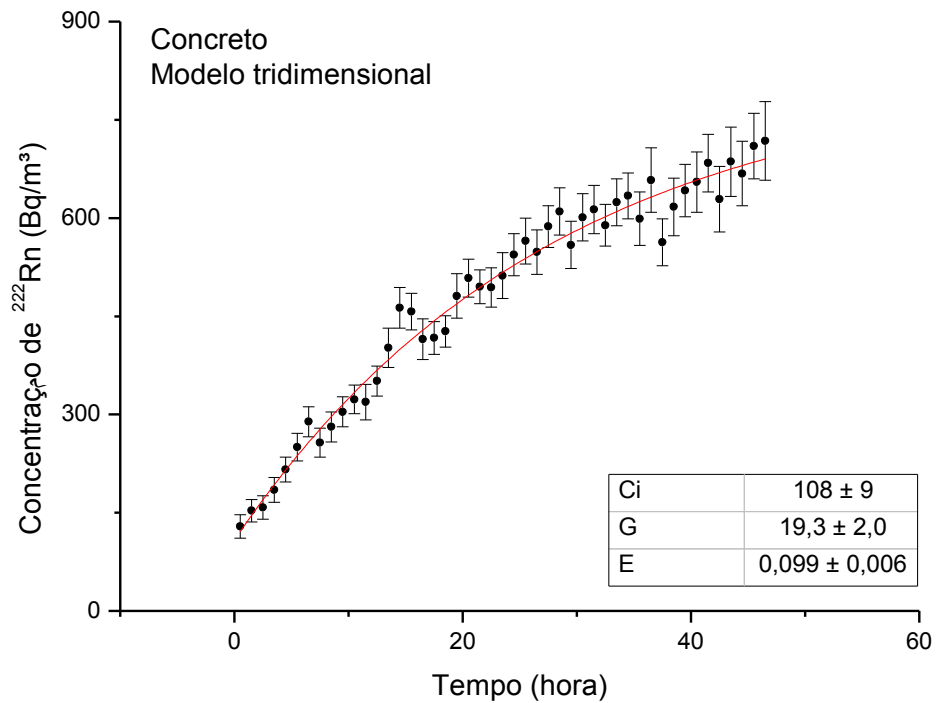


Figura 31 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 7

Fonte: autoria própria

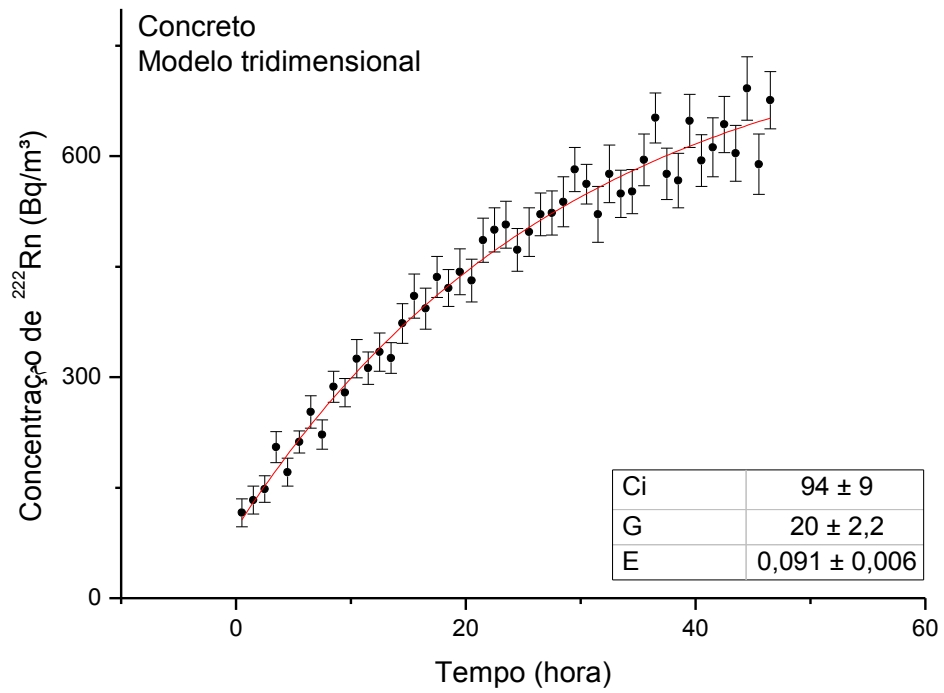


Figura 32 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 8

Fonte: autoria própria

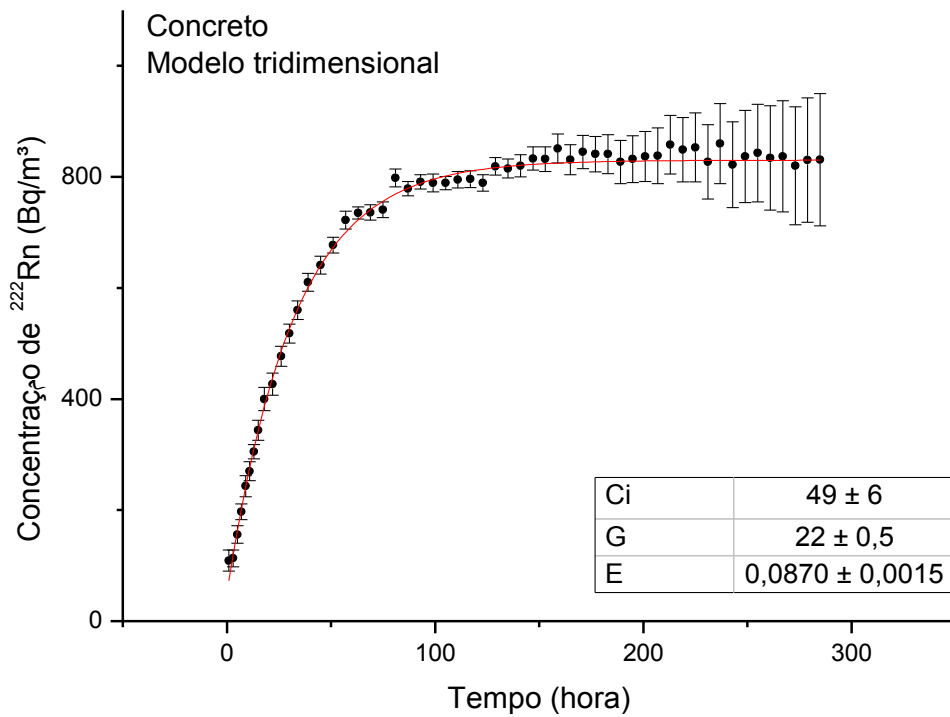


Figura 33 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 9

Fonte: autoria própria

Medidas da taxa de exalação dos corpos de prova de argamassa de cimento:

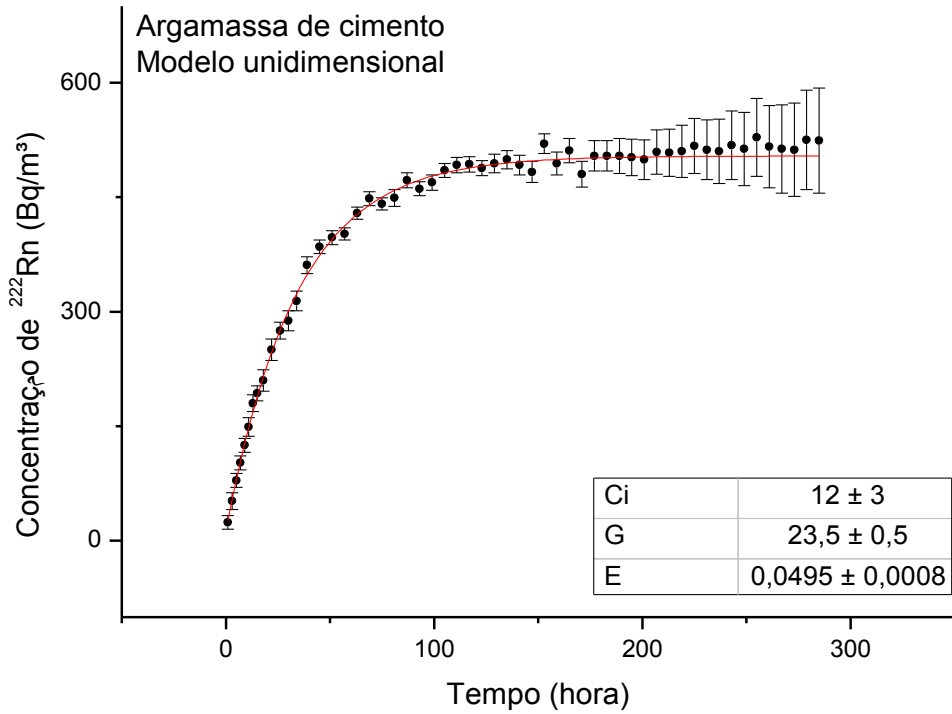


Figura 34 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 10

Fonte: autoria própria

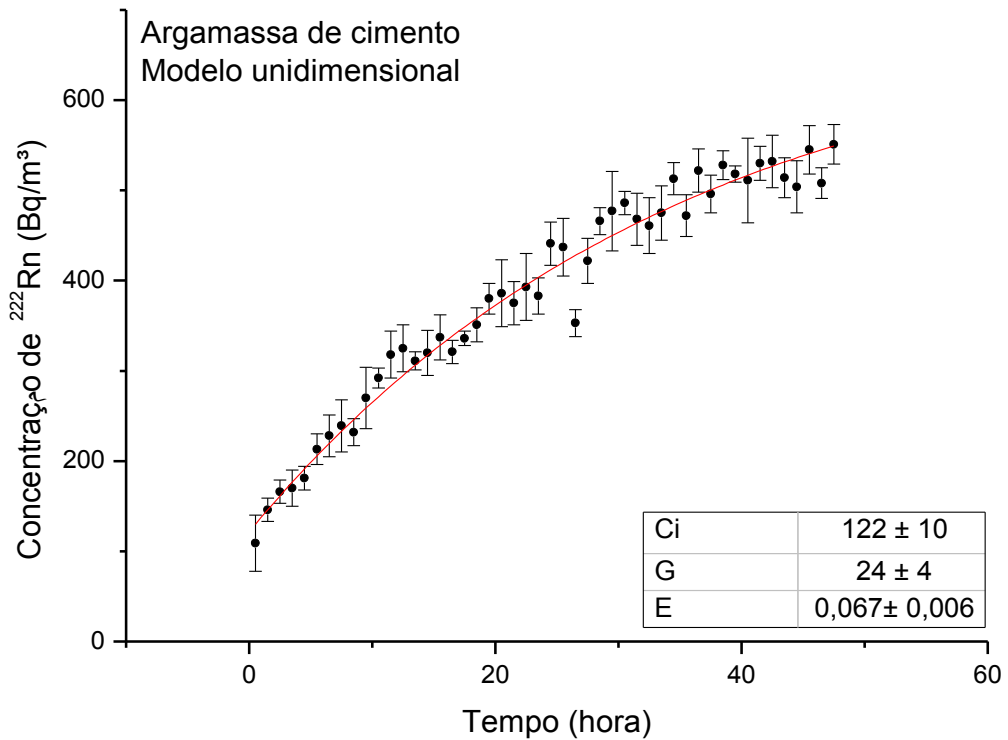


Figura 35 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 11

Fonte: autoria própria

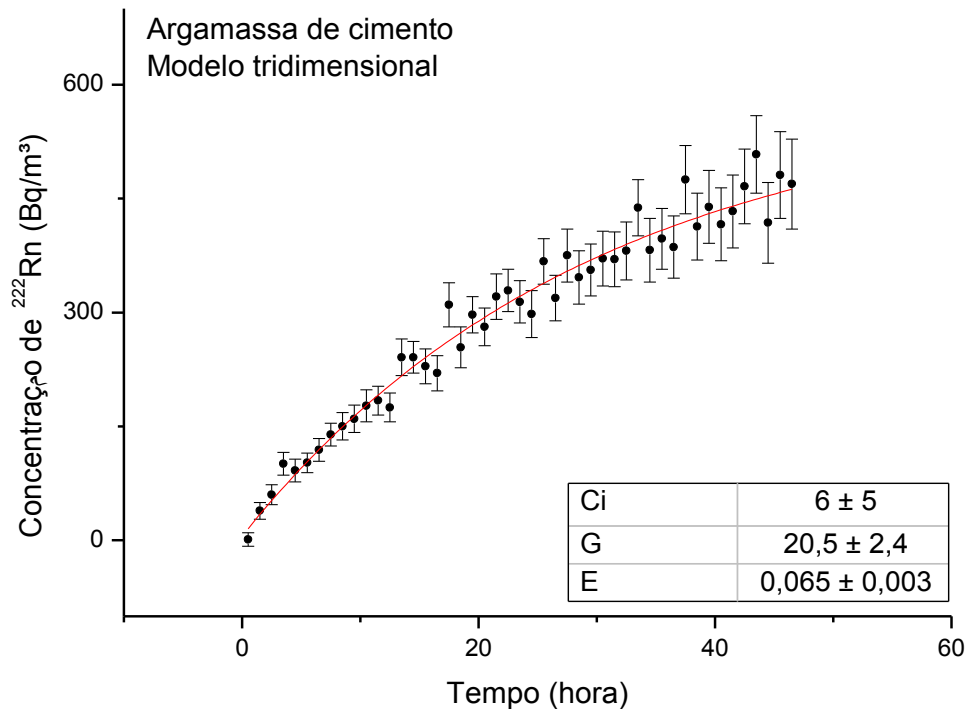


Figura 36 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 12

Fonte: autoria própria

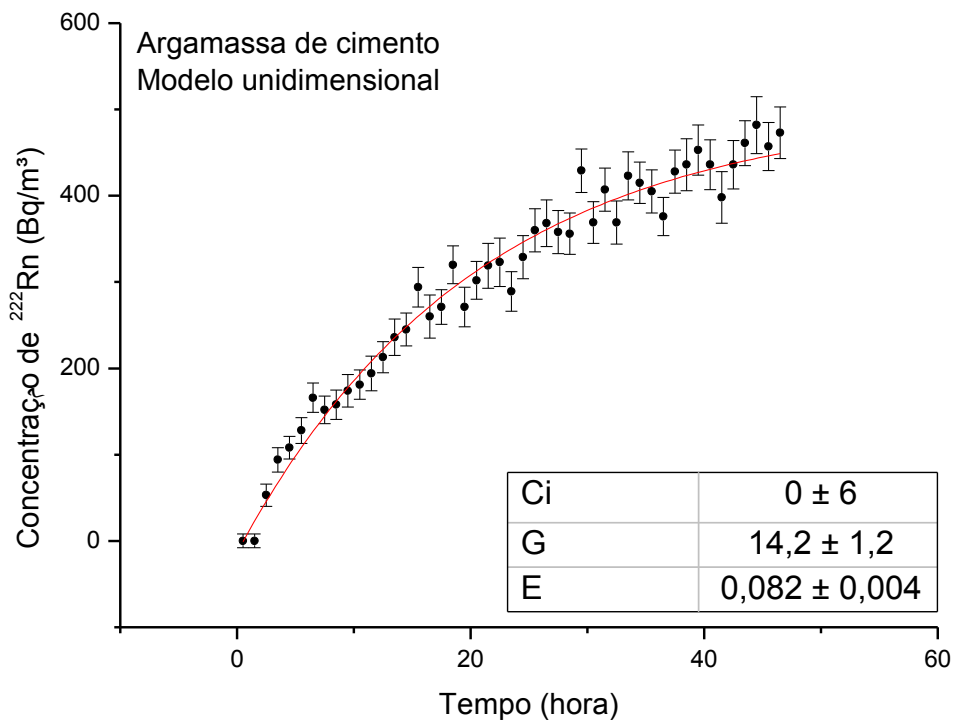


Figura 37 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 13

Fonte: autoria própria

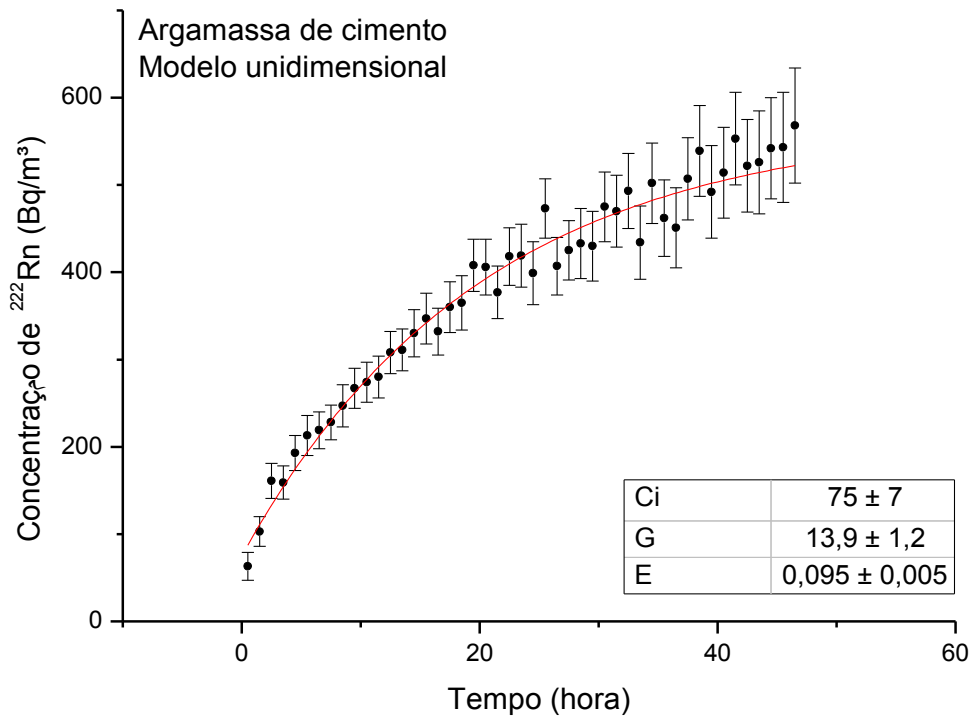


Figura 38 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 14

Fonte: autoria própria

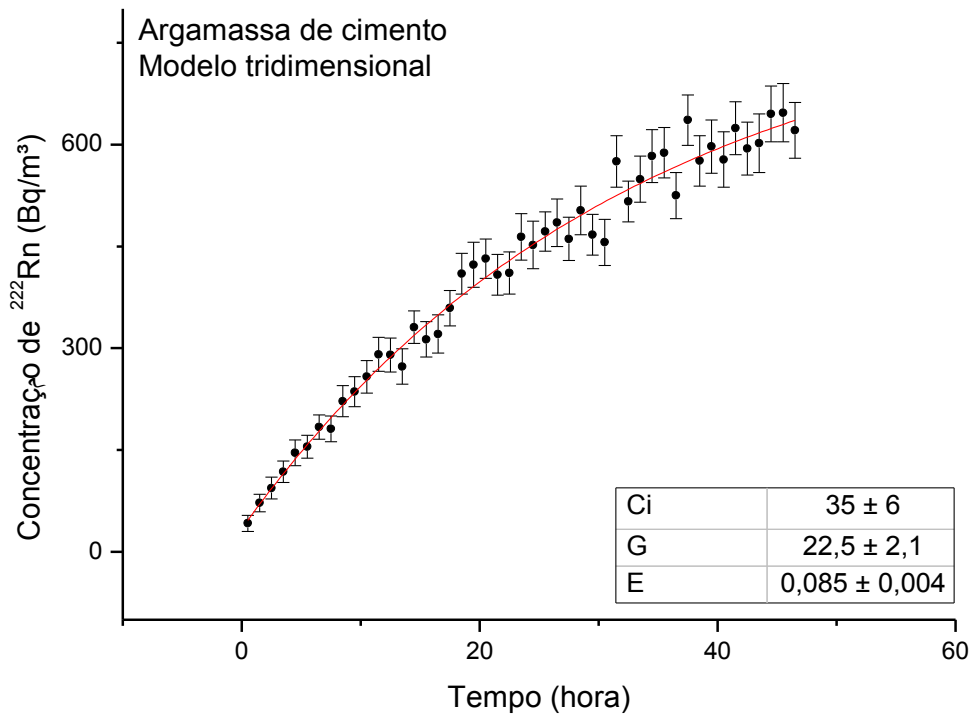


Figura 39 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 15

Fonte: autoria própria

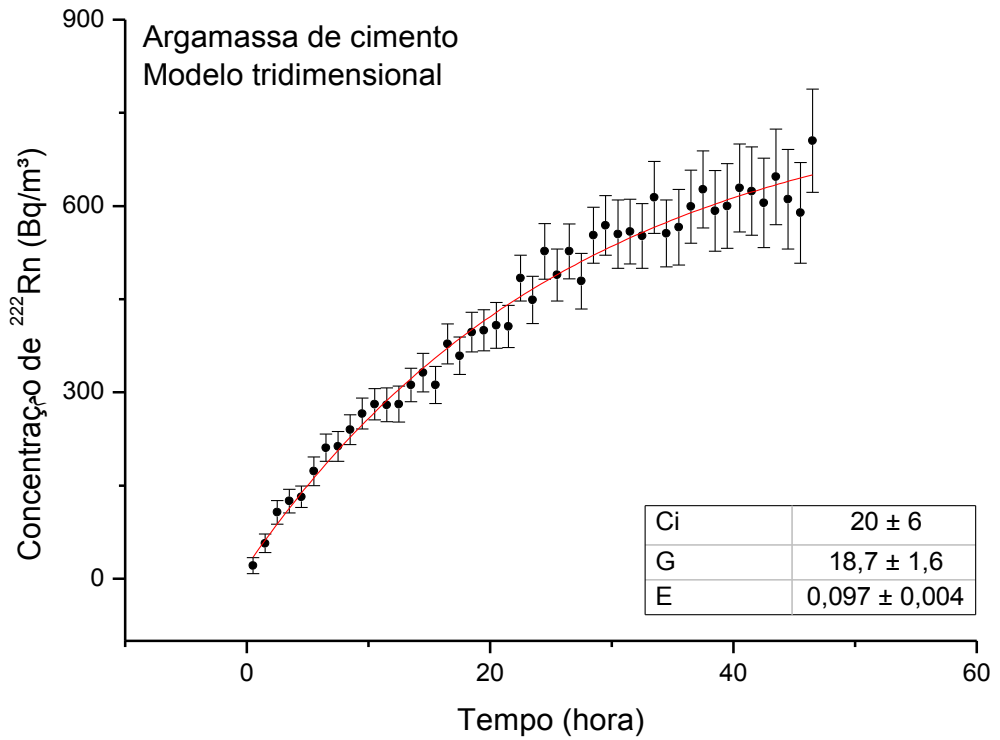


Figura 40 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 16

Fonte: autoria própria

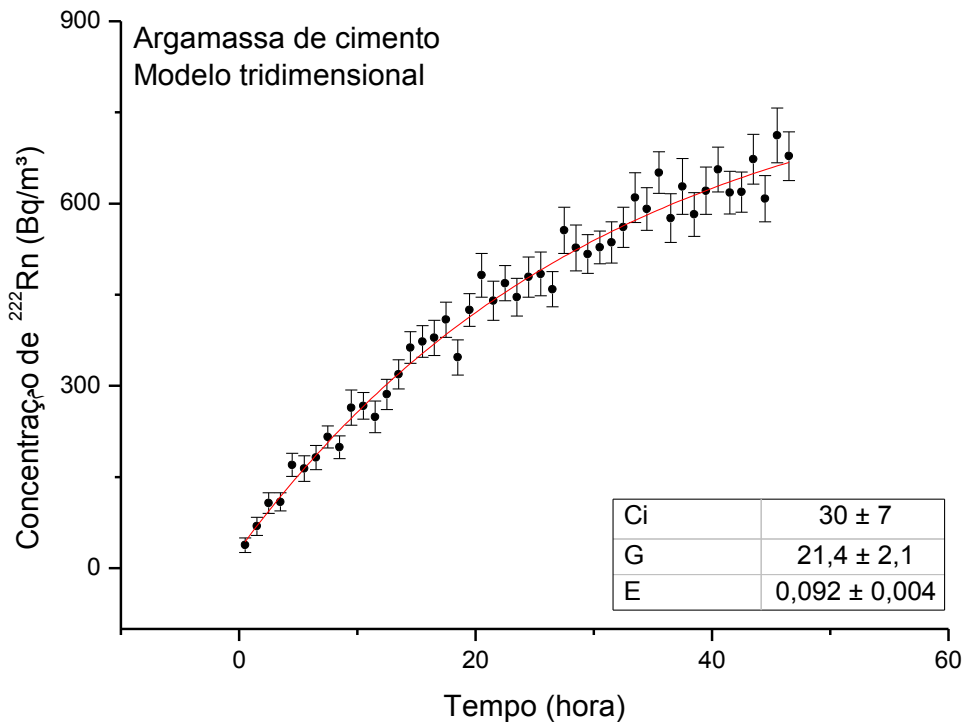


Figura 41 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 17

Fonte: autoria própria

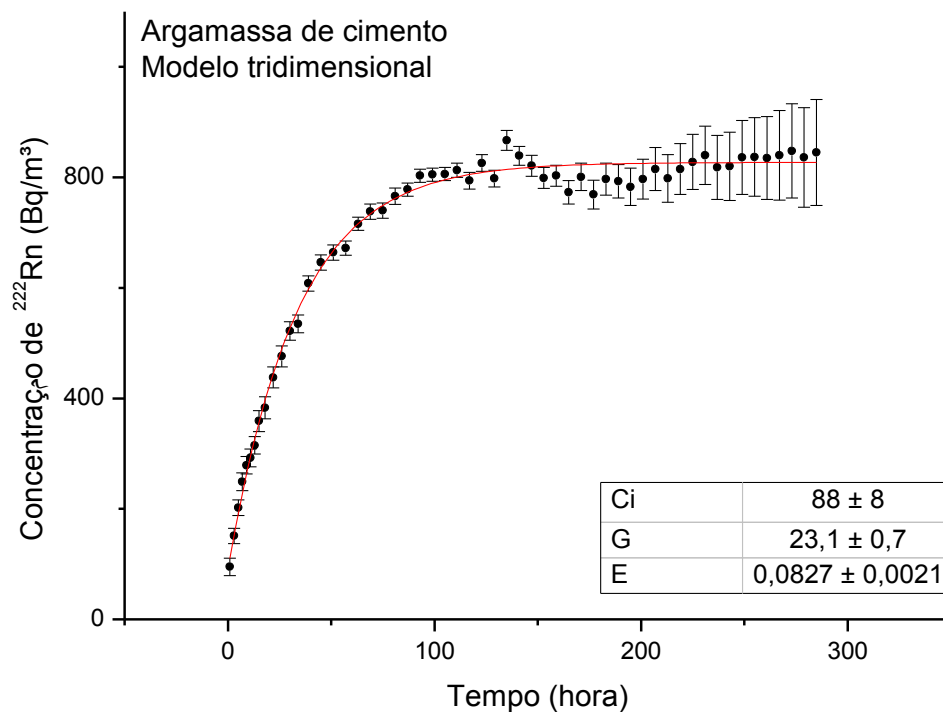


Figura 42 - Gráfico da concentração de ^{222}Rn em função do tempo, medida 18

Fonte: autoria própria

Os resultados finais estão apresentados nas tabelas 25 e 26 que foram obtidos durante a construção dos gráficos referentes a cada medição.

A título de comparação com os valores encontrados na literatura, tais como aqueles apresentados na tabela 6, a taxa de exalação E também foi expressa em $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{h}\cdot\text{kg}}\right)$, representada por E_{massa} , na qual considerou-se massa dos corpos de prova que estavam dentro do frasco de vidro, e em $\left(\frac{\text{Bq}}{\text{h}\cdot\text{m}^2}\right)$, representada por $E_{\text{área}}$, em que foi considerada a área de exalação. No caso do modelo 3D foi levada em conta toda área superficial dos corpos de prova, e no caso do modelo 1D apenas a área da superfície circular que estava livre para exalação de gás.

Tabela 25 – Parâmetros de ajuste da taxa de exalação de ^{222}Rn dos corpos de prova de concreto

Concreto						
Modelo	Tempo de medida	Ci (Bq/m^3)	G (h)	E (Bq/h)	E_{massa} ($\frac{Bq}{h \cdot kg}$)	$E_{\text{área}}$ ($\frac{Bq}{h \cdot m^2}$)
1D	12 dias	0 ± 4	24,1 ± 0,4	0,0801 ± 0,0010	0,1819 ± 0,0023	2,55 ± 0,03
	48 horas	34 ± 6	25,2 ± 1,9	0,0870 ± 0,0028	0,197 ± 0,006	2,77 ± 0,09
		36 ± 6	30 ± 3	0,079 ± 0,003	0,180 ± 0,008	2,52 ± 0,11
		87 ± 10	17,5 ± 2,5	0,104 ± 0,008	0,237 ± 0,018	3,32 ± 0,25
		83 ± 9	21,9 ± 2,8	0,094 ± 0,006	0,214 ± 0,013	3,00 ± 0,19
3D	48 horas	116 ± 9	32 ± 8	0,077 ± 0,007	0,174 ± 0,016	0,41 ± 0,04
		108 ± 9	19,3 ± 2,0	0,099 ± 0,006	0,224 ± 0,013	0,52 ± 0,03
		94 ± 9	20,0 ± 2,2	0,091 ± 0,006	0,208 ± 0,013	0,485 ± 0,029
	12 dias	49 ± 6	22,0 ± 0,5	0,0870 ± 0,0015	0,198 ± 0,003	0,461 ± 0,008

Tabela 26 - Parâmetros de ajuste da taxa de exalação de ^{222}Rn dos corpos de prova de argamassa de cimento

Argamassa de cimento						
Modelo	Tempo de medida	Ci (Bq/m^3)	G (h)	E (Bq/h)	E_{massa} ($\frac{Bq}{h \cdot kg}$)	$E_{\text{área}}$ ($\frac{Bq}{h \cdot m^2}$)
1D	12 dias	12 ± 3	23,5 ± 0,5	0,0495 ± 0,0008	0,1125 ± 0,0019	1,58 ± 0,03
	48 horas	122 ± 10	24 ± 4	0,067 ± 0,006	0,151 ± 0,013	2,12 ± 0,18
		6 ± 5	20,5 ± 2,4	0,065 ± 0,003	0,149 ± 0,008	2,08 ± 0,11
		0 ± 6	14,2 ± 1,2	0,082 ± 0,004	0,186 ± 0,009	2,60 ± 0,13
		75 ± 7	13,9 ± 1,2	0,095 ± 0,005	0,215 ± 0,012	3,02 ± 0,16
3D	48 horas	35 ± 6	22,5 ± 2,1	0,085 ± 0,004	0,192 ± 0,008	0,449 ± 0,019
		20 ± 6	18,7 ± 1,6	0,097 ± 0,004	0,221 ± 0,009	0,516 ± 0,021
		30 ± 7	21,4 ± 2,1	0,092 ± 0,004	0,208 ± 0,010	0,486 ± 0,022
	12 dias	88 ± 8	23,1 ± 0,7	0,0827 ± 0,0021	0,188 ± 0,005	0,439 ± 0,011

As tabelas 27 e 28 apresentam os resultados considerando a média para as medidas de 48 horas. A taxa de exalação

Tabela 27 - Média dos Parâmetros de ajuste da taxa de exalação do concreto

Concreto						
Modelo	Tempo de medida	Ci (Bq/m ³)	G (h)	E (Bq/h)	E_{massa} $\left(\frac{Bq}{h \cdot kg}\right)$	$E_{\acute{a}rea}$ $\left(\frac{Bq}{h \cdot m^2}\right)$
1D	12 dias	0 ± 4	24,1 ± 0,4	0,0801 ± 0,001	0,1819 ± 0,0023	2,55 ± 0,03
	48 horas	49 ± 4	23,5 ± 1,2	0,0855 ± 0,0019	0,196 ± 0,004	2,75 ± 0,06
3D	48 horas	106 ± 5	20,0 ± 1,5	0,090 ± 0,004	0,206 ± 0,008	0,482 ± 0,018
	12 dias	49 ± 6	22 ± 0,5	0,087 ± 0,0015	0,198 ± 0,003	0,461 ± 0,008

Tabela 28 – Média dos Parâmetros de ajuste da taxa de exalação da argamassa de cimento

Argamassa de cimento						
Modelo	Tempo de medida	Ci (Bq/m ³)	G (h)	E (Bq/h)	E_{massa} $\left(\frac{Bq}{h \cdot kg}\right)$	$E_{\acute{a}rea}$ $\left(\frac{Bq}{h \cdot m^2}\right)$
1D	12 dias	12 ± 3	23,5 ± 0,5	0,0495 ± 0,0008	0,1125 ± 0,0019	1,58 ± 0,03
	48horas	30 ± 3	15,1 ± 0,8	0,0746 ± 0,0020	0,172 ± 0,005	2,40 ± 0,07
3D	48 horas	28 ± 4	20,4 ± 1,1	0,0913 ± 0,0023	0 ± 4	0,481 ± 0,012
	12 dias	88 ± 8	23,1 ± 0,7	0,0827 ± 0,0021	0,188 ± 0,005	0,439 ± 0,011

Os valores da taxa de exalação $E_{\acute{a}rea}$ encontrados para o concreto e para a argamassa de cimento, modelo 1D ou 3D, encontram-se dentro da faixa de valores observados na literatura para diversos materiais de construção (veja tabela 7, na fundamentação teórica deste trabalho como exemplo).

Para tempos grandes, os termos exponenciais da equação 4.2 tendem a zero, sobrando o termo constante $\frac{E \cdot G}{V \cdot \ln 2}$, que depende de E . As medidas de 12 dias, contém dados experimentais pertencentes à região em que a função atinge um regime constante, estabelecido a partir de 150 horas, como é observado, por exemplo, nas figuras 25 e 34. Desta forma, as medidas de longa duração devem ser consideradas mais adequadas para a determinação da taxa de exalação do que as medidas de curta duração.

Observa-se que para a argamassa de cimento o radônio demora cerca de 21,1 ± 2,4 horas no caso 1D e 22,3 ± 1,7 horas no caso 3D, para ser exalado do material de construção. Para o concreto o radônio demora cerca de 24,0 ± 2,6 horas no caso 1D e 21,8 ± 2,1 horas no caso 3D, para ser exalado do material de

construção. Ou seja, não há diferença no tempo de exalação entre o caso 1D e 3D para ambos os materiais.

4.7 Resultado das medições da concentração de radônio nos materiais de construção

As tabelas 29 e 30 apresentam os resultados da concentração de ^{222}Rn que foram calculados de acordo com os dados fornecidos pelo AlphaGuard. O valor de *background* é o mesmo para ambas as medidas realizadas com os materiais de construção.

Como o equipamento estava configurado para obter um dado a cada minuto (1 *minflow*), foram obtidos 60 dados referente ao background e 120 referente a cada medida realizada com os corpos de prova. Como houve o cuidado de se esperar cerca de 10 meias-vidas para se realizar as medidas, o radônio medido é advindo do material. No caso, o a atividade do radônio é igual à atividade do rádio (equilíbrio secular). Ainda, como não se observou vazamentos, a concentração de ^{222}Rn é constante durante a medição. Desta forma, foram calculados a média e desvio padrão do valor médio para determinar o resultado final de cada medida. O valor de *background* foi subtraído dos valores das medidas principais e o erro foi calculado pela raiz da soma quadrática dos erros.

Tabela 29 - Resultado da concentração de ^{222}Rn do sistema (background)

Concentração de ^{222}Rn (Bq/m ³)		
background	Média	Erro
	36,4	5,2

Tabela 30 - Resultado da concentração de ^{222}Rn no concreto e na argamassa de cimento

Concentração de ^{222}Rn (Bq/m ³)		
Material	Sistema + amostras	Amostras
Concreto	2993 ± 57	2956 ±57
Argamassa de cimento	2188 ± 39	2152 ±39

O valor de concentração de radônio foi utilizado para determinar a atividade dos corpos de prova. O valor da atividade foi calculado considerando o volume total do material que estava dentro do frasco durante a medida. O valor de atividade de

^{222}Rn encontrado para o concreto foi de $2,32 \pm 0,04$ Bq e para a argamassa de cimento foi de $1,69 \pm 0,03$ Bq. Estes valores foram utilizados para calcular o coeficiente de emanção por meio da equação 2.5, cujos valores estão apresentados na tabela 31.

Tabela 31 - Fator de emanção do concreto e argamassa de cimento

Material	f	f (%)
Concreto	$0,382 \pm 0,010$	$38,2 \pm 1,0$
Argamassa de cimento	$0,317 \pm 0,008$	$31,7 \pm 0,8$

O fator de emanção encontrado para o concreto e a argamassa, ficaram acima dos valores que geralmente são encontrados para materiais de construção. Por exemplo, Bikit et al. (2011) encontraram valores entre 1 e 30%.

4.8 Resultado da medida da concentração de radônio da célula-teste

A tabela 32 mostra os resultados da contagem dos traços observados em uma área de $0,56 \text{ cm}^2$. A média do número de traços de *background* encontrada foi de 50. A média de traços obtida, considerando a subtração da média de traços de background, e calculado o erro associado à média foi de 1175 ± 50 .

Tabela 32 - Número de traços lidos nos detectores CR-39 em uma área de $0,56 \text{ cm}^2$

Número do detector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número de traços	1180	1146	1065	1031	1020	1384	1387	1410	1372	1259

A concentração *indoor* na célula-teste foi calculada por meio da equação 3.1, fazendo-se a correção do número de traços para 1 cm^2 . A concentração obtida foi de $1680 \pm 140 \text{ Bq/m}^3$. Esta concentração está relacionada com um ambiente (célula-teste) onde a relação área/volume é de $0,3 \text{ cm}^{-1}$. Todavia, a relação área/volume de uma residência, por exemplo, é bem menor. Consequentemente, a contribuição de radônio das paredes para o volume do ambiente de convívio humano deve ser revista.

Assim, extrapolando o valor da concentração obtida na célula-teste para um ambiente interno de dimensões aproximadas de $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$, com relação área volume igual a $0,02 \text{ cm}^{-1}$, a concentração *indoor* esperada, considerando-se um fator de $0,3/0,02$, foi recalculada pois é 15 vezes menor que a concentração medida. O

valor encontrado para a contribuição na concentração de radônio *indoor*, advinda das paredes de concreto, foi de 112 ± 9 Bq/m³.

Para um ambiente de convívio humano a norma reguladora da CNEN (2015) prevê um limite de 300 Bq/m³. Observando-se que o valor de 112 Bq/m³ é relativo apenas à contribuição das paredes e que ainda, no ambiente interno, há o radônio advindo do solo e de outras fontes, acredita-se que esta contribuição é bem representativa.

Observa-se que nesta contribuição já estão considerados os fenômenos relacionados ao transporte, pois são intrínsecos às medidas.

5 CONCLUSÕES

A forma de fabricação dos corpos de prova de concreto e argamassa de cimento – objetos de estudo desta pesquisa – garantiu similaridade com os materiais usados comumente na construção de prédios comerciais e residências. O ensaio de compressão para os corpos de prova, cuja tensão medida foi de $25 \pm 0,9$ MPa e 33 ± 4 MPa para a argamassa de cimento e concreto respectivamente, evidencia a concordância com as características comuns dos materiais de construção.

A taxa de exalação de radônio foi determinada através de metodologia que leva em conta o monitoramento do crescimento da concentração de ^{222}Rn em um sistema fechado (*Closed Chamber Method*), com medidas de longa e curta duração. O valor da grandeza taxa de exalação foi calculado por meio da construção de gráficos e ajuste da função aos dados experimentais. Além disso, o método utilizado permitiu comparar a taxa de exalação de radônio entre os modelos 1D e 3D de exalação de gás.

A taxa de exalação de radônio, em $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, encontrada para o concreto foi de: $2,55 \pm 0,03$ para o modelo 1D e $0,461 \pm 0,008$ para o modelo 3D.

A taxa de exalação de radônio, em $\text{Bq}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$, encontrada para a argamassa de cimento foi de: $1,58 \pm 0,03$ para o modelo 1D e $0,439 \pm 0,011$ para o modelo 3D.

Com relação às medidas de EDXRF, pode-se dizer que a composição elementar do concreto e da argamassa de cimento é muito similar. Ambos possuem Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Rb e Sr em sua composição. Além disso, apenas a argamassa de cimento contém Zr e apenas o concreto contém Cl.

A concentração de atividade de radionuclídeos obtidos por meio de medidas de espectrometria gama permitiu analisar a exposição à radiação proveniente dos materiais. O índice de atividade calculado foi de $0,3395 \pm 0,0017$ e $0,3106 \pm 0,0017$ e a atividade de rádio equivalente foi de $89,8 \pm 0,4$ Bq/kg e $82,8 \pm 0,4$ Bq/kg para o concreto e argamassa de cimento, respectivamente.

A concentração de ^{222}Rn encontrada na célula-teste foi de 1680 ± 140 Bq/m³, muito acima dos limites estipulados por órgãos reguladores. Todavia, este valor não representa a realidade de um ambiente de convívio humano por conta da diferença entre os fatores área/volume. Desta forma, o valor de concentração extrapolado para um ambiente de convívio humano é 15 vezes menor, 112 ± 9 Bq/m³. Ainda assim, este

valor é significativo, visto que é relativo apenas à contribuição das paredes de concreto.

Proposta para trabalhos futuros:

- Medir a taxa de exalação de outros materiais utilizados comumente na construção de prédios e residências.
- Medir a taxa de exalação de um corpo de prova fabricado de parede completa, com tijolo, argamassa, cal fino e revestimento.
- Estabelecer relações entre as características físicas destes materiais e as emanações radioativas.
- Relacionar a taxa de exalação de radônio com a permeabilidade ou porosidade dos materiais

REFERÊNCIAS

ANJOS, R.M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; SANTOS, A.N.A.; AGUIAR, J.G.; FRASCA, M.H.B.O.; BRAGE, J.A. P.; UZÊDA, D.; MANGIAL, L.; FACURE, A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO, C.; GOMES, P.R.S. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. **Radiation Measurements**. v. 39, p. 245-253, 2005.

AL-SALUITI, H.A.; REGAN, P.H.; BRADLEY, D.A.; MATTHEWS, M.; SANTAWAMAITRE, T.; MALIN, D. Preliminary Determination of Natural Radioactivity Levels of the State of Qatar Using High-Resolution Gamma-ray Spectrometry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipament**, v. 619, p. 427-431, 2010.

AMPTEK. **Miniature X-Ray Source**. 2010. Disponível em: <<http://www.amptek.com/pdf/minix.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2014.

AMPTEK. **MP1 XRF Mounting Plate for use with XR100/X-123 and Mini-X X-Ray Tube**. 2009. Disponível em: <<http://www.amptek.com/mp1.html>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

BIKIT, I.; MRDA, D.; GRUJIC, S.; KOZMIDIS-LUBURIC, U. Granulation Effects on the Radon Emanation Rate. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 145, n. 2-3, p. 182–188, 2011.

CANBERRA. **Measurement solution for nuclear safety, security and the environment**. 2015. Disponível em <<http://www.canberra.com/products/detectors/germanium-detectors.asp>>. Acesso em Janeiro de 2016.

CHAUHAN, R.P.; KUMAR, A. Study of radon transport through concrete modified with silica fume. **Radiation Measurements**, v. 59, p. 59-65, 2013.

CHEN, J.; RAHMAN, N.M.; ATIYA, I. A. Radon Exhalation From Building Materials for Decorative use. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 101, p. 317-322, 2010.

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.

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.

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.

COSTA, L.J.P. **Estudo da exalação de radônio em placas de tijolos de fosfogesso de diferentes procedências**. 2011. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2011.

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 do em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Univerdade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

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

EISBERG, R. M.; RESNICK, R. **Física quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. 35^a reimpressão. Rio de Janeiro. Elsevier, 1979.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Building Radon Out**. A step-by-step guide on how to build radon resistant homes. Office of air and radiation, 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.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Radiation dose in perspective.** Disponível em:

<<http://www.epa.gov/radiation/understand/perspective.html>>. Acessado em: Maio de 2015.

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.

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.

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

GRIEKEN, R.E.V.; MARCOWICZ, A.A. **Handbook of X-Ray Spectrometry.** 2. ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2002.

HAQUIN, G. **Natural Radioactivity and Radon in Building Materials.** 12th International Congress of the International Radiation Protection Association, Buenos Aires, 2008. Disponível em: <http://www.irpa12.org.ar/KL/III.4.4/Haquin_fp.pdf>. Acesso em: Junho de 2015.

HASSAN, N.M.; HOSODA, M.; ISHIKAWA, T.; SORIMACHI, A.; SAHOO, S. K.; TOKONAMI, S.; FUKUSHU, M. Radon migration process and its influence factors: review. **Japanese Journal of health physics.** N. 44, n. 2, p. 2018 – 231, 2009.

IAEA. International Atomic Energy Agency. **Information for public.** Disponível em <https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/InformationFor/Patients/information-public/>. Acessado em: maio de 2015.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. **ICRP 106 - Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals.** Oxford: Pergamon Press, v. 38, n. 1 – 2, 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.

JAMES INSTRUMENTS. **Operating Instructions: Poroscope Plus P-6050**. 2007. Manual do usuário, James Instruments, Inc. Disponível em: <http://www.ndtjames.com/Poroscope-Manual-p/c-p-manual.htm>. Acessado em: Outubro de 2015.

KELLER, G.; HOFFMANN, B.; FEIGENSPAN, T. Radon Permeability and Radon Exhalation of Building Materials. **The Science of the Total Environment**, v. 272, p. 85-89, 2001.

LOER. The Laboratory for Oceanographic and Environmental research. 2014. Disponível em: < <http://loer.tamug.edu/facilities.html> >. Acessado em: Janeiro de 2016.

MACACINI, J.F. **Desenvolvimento de método para quantificação da taxa de exalação de ^{222}Rn em bacia de rejeitos radioativos e estudo de solo como material mitigador**. 2008. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em ciências, Centro de energia nuclear na agricultura da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2008.

NARLOCH, D.C. **Medidas de Concentração de Radônio Proveniente de Argamassa de Cimento Portland, Gesso e Fosfogesso**. 2015. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

NBR 7215. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. 1996.

NBR 7214. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento - especificação**. 2012.

NBR NM 67. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 67: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. 2012.

NBR 5739. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739: Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. 2012.

NICI PUBLICATION – National Cancer Institute: **What you need to know about lung cancer**. Disponível em <http://cancernet.nci.nih.gov/wyntk_pubs/lung.htm>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2013.

NNDC. National Data Center. **Chart of Nuclides from Brookhaven National Laboratory**. Disponível em: <http://www.nndc.bnl.gov/chart/>. Acesso em: maio de 2015.

NUCLEAR DATA. **The Lound/LBNL Nuclear Data Search**. Disponível em <<http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/>>. Acesso em: Dezembro de 2015.

PETROPOULOS, N.P.; ANAGNOSTAKIS, M.J.; SIMOPOULOS, S.E. Building materials radon exhalation rate: ERRICCA intercomparison exercise results. **Science of the Total Environment**. 272(1-3): 109-118, 2001.

PETRUCCI, E.G.R. **Concreto de Cimento Portland**. 3ª ed. Editora: Globo, Rio de Janeiro, 1975.

RIGHI, S.; BRUZZI, L. Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Building Materials Used in Italian Dwellings. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 88, p. 158-170, 2006.

SANTOS, T.O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2010. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2010.

SANTOS, C.E.L. **Determinação dos processos de enriquecimento e das concentrações de radônio em minas subterrâneas de fluorite e carvão do estado de Santa Catarina: critérios para avaliação dos riscos biológicos**. 2008. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008

SAPHYMO. **The reference in professional radon measurement – AlphaGuard**. 2014. Manual do usuário, Saphymo. Disponível em: <http://www.radtech.it/Data/Sites/1/media/documents/products/ag_pm_gb_12_144dpi_ebook.pdf>. Acessado em: Março de 2014.

SHARMA, N.; VIRK, H. S. Exhalation Rate Study of Radon/Thoron in Some Building Materials. **Radiation Measurements**, v. 34, p. 467-469, 2001.

SHAW, J.; DUNDERDALE, J.; PAYNTER, R. A. A Review of Consumer Products Containing Radioactive Substances in the European Union. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/139.pdf>>. Acesso em: Março de 2016.

STOULOS, S.; MANOLOPOULOU, M.; PAPASTEFANO, C. Assessment of Natural Radiation Exposure and Exhalation from Building Materials in Greece. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 69, p. 225-240, 2003.

TAN, Y.; XIAO, D.; LIU, X.; TANG, Q. Measuring radon exhalation rate by tracing the radon concentration of ventilation-type accumulation chamber. **Radiation Measurements**, v. 58, p. 33-36, 2013.

TUCCIMEI, P.; CASTELLUCCIO, M.; SOLIGO, M.; MORONI, M. Radon Exhalation Rates of Building Materials: Experimental, Analytical Protocol and Classification Criteria. In: **Building materials: Properties, Performance and Applications**, Frank Columbus Editore, Nova Science Publishers. Hauppauge, NY, 2009.

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.

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, 1993.

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, 2000.

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, 2006.

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, 2008.

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.

ZHANG, L.; LEI, X.; GUO, Q.; WANG, S.; MA, X.; SHI, Z. Accurate measurements of radon exhalation rate of building materials using the closed chamber method. **Journal of Radiological Protection**, v.32, p. 315-323, 2012.

APÊNDICE A: MEDIDA DE CURTA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO (MODELO 3D)

1ª etapa – Medida de *Background*

- a) Selecionar 4 corpos-de-prova de mesmo material;
- b) Separar a quantidade de filtro (pode ser filtro de aspirador de pó, filtro de cafeteira, ou similar) necessária para embrulhar os corpos-de-prova. Colocar esta quantidade dentro do frasco de vidro;
- c) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- d) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 1 *minflow*;
- e) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- f) Após 1 hora do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

2ª etapa – Medida da taxa de exalação do material de construção

- a) Embrulhar, individualmente, os corpos-de-prova com filtro;
- b) Colocar os corpos-de-prova dentro do frasco de vidro;
- c) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- d) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 1 *minflow*;
- e) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- f) Após 48 horas do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

Transferir os resultados experimentais do equipamento para o computador e fazer a análise de dados necessária.

APÊNDICE B: MEDIDA DE CURTA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO (MODELO 1D)

1ª etapa – Preparação das amostras

- a) Selecionar 4 corpos-de-prova de mesmo material;
- b) Passar a tinta seladora, com o auxílio de um pincel, na superfície cilíndrica e em uma das superfícies circulares e deixar secar durante o período sugerido pelo fabricante (caso o corpo seja cúbico, selar cinco faces);
- c) Repetir o item b por mais três vezes, ou seja, passar quatro demãos da tinta seladora;
- d) Envelopar as superfícies que foram pintadas com plástico *contact* de forma minuciosa.

2ª etapa – Medida de *background*

- a) Separar a quantidade de filtro (pode ser filtro de aspirador de pó, filtro de cafeteira, ou similar) necessária para cobrir a superfície pela qual o gás pode sair dos corpos-de-prova. Colocar esta quantidade dentro do frasco de vidro;
- b) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- c) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 1 *minflow*;
- d) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- e) Após 1 hora do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

3ª etapa – Medida da taxa de exalação de radônio do material de construção

- a) Cobrir, individualmente, a superfície pela qual o gás pode ser exalado dos corpos-de-prova com filtro;
- b) Colocar os corpos-de-prova dentro do frasco de vidro;
- c) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- d) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 1 *minflow*;

- e) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- f) Após 48 horas do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

Transferir os resultados experimentais do equipamento para o computador e fazer a análise de dados necessária.

APÊNDICE C: MEDIDA DE LONGA DURAÇÃO DA TAXA DE EXALAÇÃO DE RADÔNIO (MODELO 1D)

1ª etapa – Preparação das amostras

- a) Selecionar 4 corpos-de-prova de mesmo material;
- b) Passar a tinta seladora, com o auxílio de um pincel, na superfície cilíndrica e em uma das superfícies circulares e deixar secar durante o período sugerido pelo fabricante (caso o corpo seja cúbico, selar cinco faces);
- c) Repetir o item b por mais três vezes, ou seja, passar quatro demãos da tinta seladora;
- d) Envelopar as superfícies que foram pintadas com plástico *contact* de forma minuciosa.

2ª etapa – Medida de *background*

- a) Separar a quantidade de filtro (pode ser filtro de aspirador de pó, filtro de cafeteira, ou similar) necessária para cobrir a superfície pela qual o gás pode sair dos corpos-de-prova. Colocar esta quantidade dentro do frasco de vidro;
- b) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- c) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 1 *minflow*;
- d) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- e) Após 1 hora do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

3ª etapa – Medida da taxa de exalação de radônio do material de construção

- a) Cobrir, individualmente, a superfície pela qual o gás pode ser exalado dos corpos-de-prova com filtro;
- b) Colocar os corpos-de-prova dentro do frasco de vidro;
- c) Conectar os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a figura esquemática;
- d) Ligar o equipamento *AlphaGuard* e anotar os dados pertinentes (número da corrida e hora). O *AlphaGuard* deve estar configurado no modo 10 *minflow*;

- e) Aguardar o tempo de espera do equipamento e, imediatamente após, ligar a bomba de ar, que deve funcionar com uma taxa de volume de 0,5 L/min;
- f) Após 12 dias (288 horas) do início da medida, desligar o equipamento e a bomba.

Transferir os resultados experimentais do equipamento para o computador e fazer a análise de dados necessária.

APÊNDICE D – GRÁFICOS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

A seguir apresenta-se dois exemplos de gráfico para o concreto e para a argamassa de cimento referente ao ensaio de compressão sob o qual os corpos de prova foram submetidos. O gráfico da Tensão *versus* Deformação foi fornecido pelo programa do equipamento que realizou a medida.

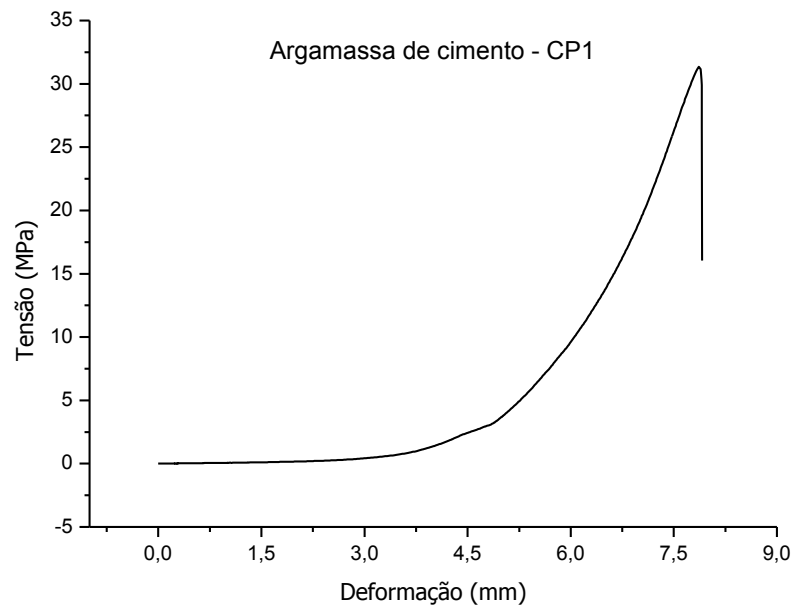


Figura 43 - Gráfico da tensão em função da deformação, argamassa de cimento, CP1

Fonte: Autoria própria

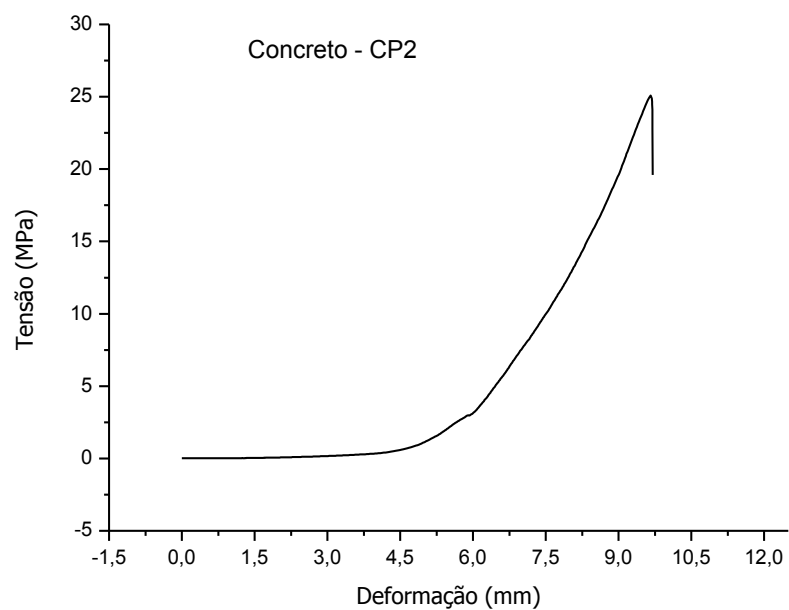


Figura 44 - Gráfico da tensão em função da deformação, concreto, CP2

Fonte: Autoria própria