

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

DANIELLE CRISTINE NARLOCH

**MEDIDAS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO PROVENIENTE DE  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND, GESSO E FOSFOGESSO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2015

DANIELLE CRISTINE NARLOCH

**MEDIDAS DE CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO PROVENIENTE DE  
ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND, GESSO E FOSFOGESSO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” - Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk.

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

CURITIBA

2015

---

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**

---

N231m  
2015 Narloch, Danielle Cristine  
Medidas de concentração de radônio proveniente de argamassas de cimento Portland, gesso e fosfogesso / Danielle Cristine Narloch.-- 2015.  
104 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2015.  
Bibliografia: f. 87-93.

1. Radon - Medição. 2. Espectrometria de raio gama. 3. Argamassa - Análise. 4. Cimento portland. 5. Gesso. 6. Fosfogesso. 7. Materiais de construção - Aspectos ambientais. 8. Métodos de simulação. 9. Engenharia Biomédica. 10. Engenharia Elétrica - Dissertações. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich, orient. II. Corrêa, Janine Nicolosi, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

---

CDD: Ed. 22 -- 621.3

**Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba**

Título da Dissertação N°. \_\_\_\_\_

## **Medidas de Concentração de Radônio Proveniente de Argamassas de Cimento Portland, Gesso e Fosfogesso**

por

**Danielle Cristine Narloch**

**Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk**  
**Coorientadora: Prof.a Dra. Janine Nicolosi Corrêa**

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **Engenharia Biomédica, Engenharia Biomédica, Materiais e Componentes de Construção, Engenharia Nuclear** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às **9:0h** do dia **14 de setembro de 2015**. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

---

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

---

Profa. Dra. Juliana Machado Casali Peruch  
(IFSC)

---

Profa. Dra. Jaqueline Kappke  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Wellington Mazer  
(UTFPR)

Visto da coordenação:

---

Prof. Dr. Emilio Carlos Gomes Wille  
(Coordenador do CPGEI)

À minha família, pelo amor e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

Aos meus pais Daniel e Elizabeth e irmão Alysson pelo amor e incentivo.

Ao professor Sergei, meu orientador, pelos ensinamentos, apoio e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Janine pela co-orientação e por estar sempre presente e contribuindo com todas as etapas da pesquisa.

À professora Juliana pela ajuda com seus conhecimentos na área da construção civil.

Ao Gustavo, técnico de laboratório, pela disponibilidade em ajudar nos procedimentos do departamento de construção civil.

Ao professor Zildete e Talita do CDTN, por disponibilizar seu laboratório para caracterização dos materiais da pesquisa.

Ao professor Joaquim da UERJ por fornecer o equipamento para análise das amostras.

À UTFPR pelo curso ofertado.

Ao CPGEI pela oportunidade de fazer o curso.

À CAPES pelo apoio financeiro, por meio de bolsa, durante todo o período do mestrado.

Ao DAFIS pelo suporte financeiro para inscrição em congresso.

Aos meus amigos e colegas do laboratório pela companhia e ajuda, especialmente a Flávia que contribuiu muito com seus conhecimentos na área do radônio e a Catarina e Alessandro na área da EDXRF.

## RESUMO

NARLOCH, Danielle C. Medidas de concentração de radônio proveniente de argamassas de cimento Portland, gesso e fosfogesso. 2015. 104 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O cimento Portland é bastante empregado na construção civil e apresenta em sua composição o gesso natural. Para minimizar custos é possível substituir parte do gesso desta composição pelo fosfogesso. O fosfogesso é um resíduo gerado a partir da produção dos fertilizantes e é constituído, essencialmente, por cálcio dihidratado e algumas impurezas, como fluoretos, metais em geral e radionuclídeos. Atualmente, toneladas de fosfogesso são armazenadas à céu aberto próximo das indústrias de fertilizantes, causando a contaminação do meio ambiente. O elemento  $^{226}\text{Ra}$ , presente nesses materiais, ao passar pela série de decaimento radioativo, transforma-se em gás  $^{222}\text{Rn}$ . Esse gás, ao ser inalado pode decair dentro dos pulmões e neste caso, os seus produtos depositam-se nas paredes pulmonares ocasionando exposição à radiação, podendo ser um potencial causador de câncer pulmonar. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi medir os níveis de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  em corpos de prova de argamassa de cimento Portland, de gesso e de fosfogesso provenientes do Estado do Paraná, além de caracterizar o material e estimar a concentração de radônio em um ambiente de convívio humano hipotético construído com paredes destes materiais. Para as medidas de atividade do  $^{222}\text{Rn}$  foi utilizado o monitor AlphaGUARD (Saphymo GmbH). A análise qualitativa e quantitativa foi realizada por meio da espectrometria gama e da EDXRF com tubos de alvos de Au e Ag (AMPTEK), e com alvo de Mo (ARTAX) e os ensaios mecânicos com equipamento de raios X (Gilardoni) e com a prensa mecânica (EMIC). Os valores médios da atividade do radônio no ar obtidos pelo estudo dos materiais armazenados no recipiente foram de  $854 \pm 23 \text{ Bq/m}^3$ ,  $60,0 \pm 7,2 \text{ Bq/m}^3$  e  $52,9 \pm 5,4 \text{ Bq/m}^3$  para argamassas de cimento Portland, de gesso e de fosfogesso, respectivamente. Estes resultados extrapolados para o ambiente hipotético de  $36 \text{ m}^3$  com paredes revestidas com os materiais foram de  $3366 \pm 91 \text{ Bq/m}^3$ ,  $237 \pm 28 \text{ Bq/m}^3$  e  $208 \pm 21 \text{ Bq/m}^3$  para argamassas de cimento Portland, gesso e fosfogesso. Considerando o limite de  $300 \text{ Bq/m}^3$  estabelecido pela ICRP, observa-se que, para o revestimento de cimento Portland a exposição não é segura e requer alguns procedimentos de mitigação específicos. A partir da espectrometria gama foi calculado o valor do rádio equivalente ( $\text{Ra}_{\text{eq}}$ ) para as argamassas de cimento Portland, gesso e fosfogesso que resultou em  $78,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$ ;  $58,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$  e  $68,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$ , respectivamente. Os valores do  $\text{Ra}_{\text{eq}}$  das amostras encontram-se inferiores ao limite máximo de  $370 \text{ Bq/kg}$ . Em relação a análise qualitativa e quantitativa das amostras por EDXRF, os resultados permitiram identificar e quantificar os elementos que compõe as amostras como o Ca, S, Fe, entre outros.

**Palavras chave:** Radônio. Cimento Portland. Gesso natural. Fosfogesso.

## ABSTRACT

NARLOCH, Danielle C. Measurements of Radon concentration from Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortars. 2015. 104 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Portland cement being very common construction material has in its composition the natural gypsum. To decrease the costs of manufacturing, the cement industry is substituting the gypsum in its composition by small quantities of phosphogypsum, which is the residue generated by the production of fertilizers and consists essentially of calcium dihydrate and some impurities, such as fluoride, metals in general, and radionuclides. Currently, tons of phosphogypsum are stored in the open air near the fertilizer industries, causing contamination of the environment. The  $^{226}\text{Ra}$  present in these materials, when undergoes radioactive decay, produces the  $^{222}\text{Rn}$  gas. This radioactive gas, when inhaled together with its decay products deposited in the lungs, produces the exposure to radiation and can be a potential cause of lung cancer. Thus, the objective of this study was to measure the concentration levels of  $^{222}\text{Rn}$  from cylindrical samples of Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortar from the state of Paraná, as well as characterizer the material and estimate the radon concentration in an environment of hypothetical dwelling with walls covered by such materials. Experimental setup of  $^{222}\text{Rn}$  activity measurements was based on AlphaGUARD detector (Saphymo GmbH). The qualitative and quantitative analysis was performed by gamma spectrometry and EDXRF with Au and Ag targets tubes (AMPTEK), and Mo target (ARTAX) and mechanical testing with x-ray equipment (Gilardoni) and the mechanical press (EMIC). Obtained average values of radon activity from studied materials in the air of containers were of  $854 \pm 23 \text{ Bq/m}^3$ ,  $60,0 \pm 7,2 \text{ Bq/m}^3$  e  $52,9 \pm 5,4 \text{ Bq/m}^3$  for Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortar, respectively. These results extrapolated into the volume of hypothetical dwelling of  $36 \text{ m}^3$  with the walls covered by such materials were of  $3366 \pm 91 \text{ Bq/m}^3$ ,  $237 \pm 28 \text{ Bq/m}^3$  e  $208 \pm 21 \text{ Bq/m}^3$  for Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortar, respectively. Considering the limit of  $300 \text{ Bq/m}^3$  established by the ICRP, it could be concluded that the use of Portland cement plaster in dwellings is not secure and requires some specific mitigation procedure. Using the results of gamma spectrometry there were calculated the values of radium equivalent activity concentrations ( $R_{\text{eq}}$ ) for Portland cement, gypsum and phosphogypsum mortar, which were obtained equal to  $78,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$ ;  $58,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$  e  $68,2 \pm 0,9 \text{ Bq/kg}$ , respectively. All values of radium equivalent activity concentrations for studied samples are below the maximum level of  $370 \text{ Bq/kg}$ . The qualitative and quantitative analysis of EDXRF spectra obtained with studied mortar samples allowed to evaluate quantitatively and the elements that constitute the material such as Ca, S, Fe, and others.

**Keywords:** Radon. Portland cement. Natural gypsum. Phosphogypsum.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Séries radioativas do urânio, actínio e tório.....	19
Figura 2 - Propriedades do gás radônio .....	21
Figura 3 - Transporte do gás radônio através dos poros do material.....	23
Figura 4 - Mobilidade dos gases nos diversos tipos de solo.....	28
Figura 5 - Locais de entrada de <sup>222</sup> Rn em uma residência.....	29
Figura 6 - Etapas da produção de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e formação do fosfogesso .....	42
Figura 7 - Lagos de sedimentação de fosfogesso .....	42
Figura 8 - Armazenamento de pilhas de fosfogesso à céu aberto .....	42
Figura 9 - Fitas de DNA .....	47
Figura 10 - Inalação do radônio e interação dos seus produtos com o DNA .....	48
Figura 11 - Gesso natural na forma de pedra .....	50
Figura 12 - Estufa (A) e moinho de bolas (B).....	50
Figura 13 - Misturador mecânico sem a cuba .....	51
Figura 14 - Corpos de prova de cimento Portland.....	52
Figura 15 - Argamassa de fosfogesso no molde (A) e corpos de prova de fosfogesso (B).....	53
Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão do corpo de prova .....	54
Figura 17 - Equipamento de raios X para a análise da porosidade das amostras.....	55
Figura 18 - Painel de comando do equipamento de raios X.....	56
Figura 19 - Pastilhas de argamassa de cimento Portland, fosfogesso e gesso natural.....	57
Figura 20 - Equipamento de EDXRF da Amptek .....	58
Figura 21 - Arranjo dos componentes do equipamento de EDXRF ARTAX.....	59
Figura 22 - Medida da amostra com o equipamento de EDXRF ARTAX .....	60
Figura 23 - Espectrômetro gama localizado no CDTN .....	62
Figura 24 - Recipiente de vidro com a amostra.....	64
Figura 25 - Ventilação ativa em circuito aberto .....	65
Figura 26 - Circuito fechado de medida com o AlphaGUARD .....	66
Figura 27 - Medida do corpo de prova com o detector AlphaGUARD .....	66
Figura 28 - Radiografias dos três tipos de amostras: A) argamassa de fosfogesso; B) argamassa de gesso e C) argamassa de cimento Portland.....	69
Figura 29 - Espectro da amostra de argamassa de gesso natural proveniente da medida com o tubo de Ag .....	70
Figura 30 - Espectro da amostra de argamassa de fosfogesso proveniente da medida com o tubo de Ag .....	71
Figura 31 - Espectro da amostra de argamassa de cimento Portland proveniente da medida com o tubo de Ag .....	71
Figura 32 - Espectro da amostra de argamassa de cimento Portland proveniente da medida com o tubo de Mo.....	72
Figura 33 - Espectro da amostra de argamassa de gesso natural proveniente da medida com o tubo de Mo.....	73

Figura 34 - Espectro da amostra de argamassa de fosfogesso proveniente da medida com o tubo de Mo.....73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do radônio e os produtos do seu decaimento.....	22
Tabela 2 - Concentrações da atividade dos radionuclídeos em diversos tipos de rocha .....	25
Tabela 3 - Concentrações médias da atividade dos radionuclídeos presentes no solo de diferentes países.....	26
Tabela 4 - Média mundial de concentração de $^{222}\text{Rn}$ em ambientes indoor.....	31
Tabela 5 - Concentrações de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ em materiais de construção.....	34
Tabela 6 - Exigências químicas para o cimento Portland CPV-ARI.....	37
Tabela 7 - Componentes químicos básicos do cimento Portland da Eslováquia.....	38
Tabela 8 - Concentração da atividade de radionuclídeos presentes no cimento Portland.....	38
Tabela 9 - Concentração da atividade dos radionuclídeos presentes em cimentos de diversos países .....	39
Tabela 10 - Processo de produção do fosfogesso .....	41
Tabela 11 - Percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura de fosfogesso com gesso .....	43
Tabela 12 - Análise elementar e quantitativa do fosfogesso por meio da técnica de EDXRF .	44
Tabela 13 - Análise elementar e quantitativa do fosfogesso por meio da técnica de espectrometria gama .....	44
Tabela 14 - Atividade específica total do gesso natural .....	46
Tabela 15 - Materiais utilizados na confecção dos corpos de prova .....	53
Tabela 21 - Composição do cimento Portland.....	60
Tabela 18 - Concentrações médias, do ano de 2014, dos componentes químicos presentes no cimento Portland.....	61
Tabela 16 - Resultado do ensaio de resistência à compressão fornecido pelo equipamento....	67
Tabela 17 - Média e erro final da resistência à compressão das amostras .....	68
Tabela 19 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de gesso natural .....	75
Tabela 20 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de cimento Portland.....	75
Tabela 22 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de fosfogesso .....	76
Tabela 23 - Atividade específica das amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso .....	77
Tabela 24 - Atividade específica do $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ presentes nas amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso.....	78
Tabela 25 - Atividade específica do $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ presentes nas três amostras após a realização dos cálculos .....	79
Tabela 26 - Resultado do rádio equivalente ( $Ra_{eq}$ ).....	79
Tabela 27 - Resultado do índice de concentração de atividade (I).....	80
Tabela 28 - Concentração de $^{222}\text{Rn}$ proveniente das amostras de argamassa de fosfogesso, gesso natural e cimento Portland .....	81
Tabela 29 - Valores da concentração média de $^{222}\text{Rn}$ nos corpos de prova de argamassa de fosfogesso, gesso natural e cimento Portland.....	81
Tabela 30 - Valor do fator volume/área no recipiente e no ambiente hipotético .....	82

Tabela 31 - Resultado do cálculo da concentração média de $^{222}\text{Rn}$ para simular os ambientes com revestimento de argamassa de cimento, de fosfogesso e de gesso natural .....	82
Tabela 32 - Coeficiente de emissão das amostras .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
Bq/kg	Bequerel por quilograma
Bq/m <sup>3</sup>	Becquerel por metro cúbico
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de cálcio ou anidrite
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNA	Ácido desoxirribonucleico
EDTA	Etilenodiamino tetra acético
EDXRF	Espectroscopia por Dispersão de Energia de Fluorescência de Raios X
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
HPGe	Germânio hiperpuro
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Ácido fosfórico
ICRP	<i>International Commission Radiation Protection</i>
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LET	<i>Linear Energy Transfer</i>
mGy	mili gray
MPa	Mega Pascal
mrad	Mili rad
mSv	Mili sievert
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NNDC	<i>National Nuclear Data Center</i>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
pCi/L	pico curie por litro
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee and Effects of Atomic Radiation</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WHO	<i>World Health Organization</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 MOTIVAÇÕES .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
2.1 Radioatividade Natural .....	17
2.2 Radônio-222 .....	20
2.2.1 Radônio-222 no solo .....	24
2.2.2 Radônio-222 indoor .....	29
2.2.3 Radônio-222 em materiais de construção .....	32
2.2.3.1 Cimento Portland .....	36
2.2.3.2 Fosfogesso .....	40
2.2.3.3 Gesso natural .....	45
2.3 Efeitos Biológicos .....	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
3.1 Materiais e confecção das amostras .....	49
3.2 Resistência à compressão das amostras .....	54
3.3 Porosidade do material com equipamento de raios X .....	55
3.4 Caracterização elementar e análise quantitativa das amostras .....	56
3.4.1 Espectroscopia por dispersão de energia de fluorescência de raios X (EDXRF) .....	56
3.4.2 Espectrometria gama com detector de germânio hiperpuro - HPGe .....	62
3.5 Medidas com o detector AlphaGUARD .....	63
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	67
4.1 Ensaio de Resistência à compressão das amostras .....	67
4.2 Porosidade do material .....	69
4.3 Caracterização elementar das amostras .....	70
4.3.1. Análise elementar com a técnica de EDXRF .....	70
4.3.1.1 Análise quantitativa com a técnica de EDXRF .....	74
4.4 Medidas com AlphaGUARD .....	80
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	84
5.1 Conclusões gerais .....	84
5.2 Sugestões de trabalhos futuros .....	85
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	87
<b>APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES SOBRE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO RELACIONADOS AO TRABALHO</b> .....	94
<b>ANEXO A - RELATÓRIO DE ENSAIO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA</b> .....	95
<b>ANEXO B – ANÁLISE QUANTITATIVA, POR MEIO DA EDXRF, DAS AMOSTRAS COM TUBO DE Ag E Au</b> .....	96
<b>ANEXO C – RESULTADO DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</b> .....	102

## 1 INTRODUÇÃO

Os seres humanos estão constantemente expostos à radiação ionizante proveniente das fontes radioativas naturais, também denominadas radiação de fundo ou *background*. A maior exposição a essas fontes ocorre devido às partículas de alta energia originadas dos raios cósmicos que atingem a atmosfera da Terra e da crosta terrestre. Dentre os elementos radioativos presentes na Terra encontra-se o radônio, um radioisótopo relevante na contribuição da exposição dos indivíduos (UNSCEAR, 2000).

O radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás naturalmente radioativo, e tem meia-vida de aproximadamente 3,8 dias, além de ser inodoro, insípido e incolor (ATSDR, 2012; NNDC, 2015). Devido a estas características faz-se necessário o uso de detectores específicos para identificar e quantificar a sua presença. Este gás origina-se do decaimento radioativo da série do urânio ( $^{238}\text{U}$ ). O  $^{238}\text{U}$  é encontrado em diferentes quantidades em rochas, solo, concreto e tijolos (WHO, 2004; UNSCEAR, 2000). Segundo a ATSDR (2012) o radônio está presente no solo, pelo fato deste ser rico em urânio e conseqüentemente também está presente nas águas subterrâneas, no ar e nos materiais de construção.

Um dos produtos do decaimento do urânio é o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ) que ao decair, emite uma partícula alfa e origina o  $^{222}\text{Rn}$ . O radônio é um elemento instável e seu conseqüente decaimento ocorre por meio de emissão alfa. Quando o gás radônio é inalado, o processo de decaimento radioativo ocorre no interior dos pulmões, surgindo os filhos ou progênitos do radônio. Estes produtos do decaimento colidem com o parênquima pulmonar podendo ocasionar os efeitos biológicos devido a ionização do meio (WHO, 2004). Esta interação contribui para o fato de que, depois do cigarro, o radônio é considerado a segunda causa mais importante de câncer pulmonar (WHO, 2009). Da mesma forma, a água também apresenta radônio que pode ser liberado da água utilizada em ambientes internos, contribuindo para a dose, e, quando ingerida pode interagir com as células sensíveis do trato gastrointestinal e outros órgãos por meio da circulação sanguínea (WHO, 2009; HOPKE *et al.*, 2000).

Os materiais de construção apresentam importante contribuição para a exalação do gás radônio nos ambientes *indoor*, pelo fato de serem derivados principalmente do solo que é a maior fonte de radionuclídeos (EISENBUND e GESSEL, 1997).

O fosfogesso é um subproduto originado a partir do ataque químico da apatita encontrada em rocha fosfática utilizada para a produção de fertilizantes (PEREIRA, 2010). O fosfogesso é um resíduo composto por cálcio dihidratado e de impurezas como metais pesados (Cd, As, Pb e Zi), fluoretos e radionuclídeos das séries de desintegração do urânio e tório (COTA *et al.*, 2012). A geração do resíduo fosfogesso ocorre em grande escala, sendo 5,4 milhões de toneladas por ano (MAZZILLI *et al.*, 2000). Esta grande quantidade gerada, aliada a falta de uso deste resíduo, ocasiona pilhas a céu aberto, próximo às indústrias de fertilizantes (COTA *et al.*, 2012).

O contato direto das impurezas do fosfogesso com o solo, águas subterrâneas e o ar, pode ocasionar contaminação ambiental (FERNANDES *et al.*, 2004). Uma solução possível para esse problema é a reutilização deste resíduo na indústria da construção civil (CANUT, 2006). Uma das aplicações do fosfogesso é na produção do cimento Portland, onde porção do gesso natural presente no cimento é substituída pelo fosfogesso, já que ambos possuem propriedades similares (PEREIRA, 2010; CANUT, 2006). O cimento Portland contém gesso e fosfogesso e é produzido de uma mistura de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) com areia ( $\text{SiO}_2$ ) e argila (silicato de alumina), e outros elementos secundários  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  (PEREIRA, 2010; NAIN *et al.*, 2006).

Neste contexto, sob o argumento de que o radônio indica a presença de outros radionuclídeos, esse trabalho destina-se a conhecer os níveis de concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  em corpos de prova de argamassa de cimento Portland, fosfogesso e gesso natural originados no Estado do Paraná, bem como correlacionar esses valores com ambientes hipotéticos *indoor*.

## 1.1 MOTIVAÇÕES

A exposição ao gás radônio é motivo de preocupação, pois está presente no cotidiano das pessoas por meio do solo, da água, do ar e dos materiais de construção. A inalação desse gás pode ocasionar o câncer de pulmão, pois além da emissão alfa deste radionuclídeo, ainda há a interação dos produtos do  $^{222}\text{Rn}$  ficam aderidos ao parênquima pulmonar (UNSCEAR, 2000). Existem várias pesquisas internacionais (UNSCEAR, 2000, EPA, 2001; ICRP, 1993; WHO, 2009; EUROPEAN COMMISSION, 1999) e particularmente brasileiras (DEL CLARO, 2013; CORRÊA, 2006; CANUT, 2006; COSTA, 2011; SANTOS, 2010; FIOR, 2008) que abordam esse assunto e mostram a relevância em minimizar a exposição ao  $^{222}\text{Rn}$ . Alguns países



apresentam normas que regulamentam os limites de concentração do radônio em ambientes *indoor* (UNSCEAR, 2000; EPA, 2001; ICRP, 1993), porém não é estipulado valor limite para a exposição ao radônio referente a cada tipo de material de construção.

O grupo de pesquisa do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) desde 2003, faz pesquisa sobre o radônio e trabalha em cooperação com o Laboratório de Radioatividade Natural do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) e outros pesquisadores de outras instituições como o IPEN, USP e IEN, afim de ampliar as pesquisas e adquirir mais dados que possam caracterizar os materiais e a exposição no Brasil.

No Estado do Paraná existem poucos trabalhos sobre o radônio proveniente de materiais de construção. Por isso, acredita-se ser interessante conhecer as concentrações do  $^{222}\text{Rn}$  no cimento Portland e de seus dois componentes, o gesso natural e o fosfogesso. Desta forma, será possível colaborar com o banco de dados de órgãos reguladores nacionais que estabelecem limites de exposição humana com a finalidade de minimizar os riscos à saúde pública. Além disso, em congressos científicos tem-se discutido sobre o uso do fosfogesso na construção civil com o intuito de reduzir as pilhas deste resíduo e, conseqüentemente, a exposição dos indivíduos. Devido a essa preocupação, novas normas têm sido estabelecidas, como, por exemplo, a Resolução nº 171/14 da CNEN que foi publicada no dia 30 de abril de 2014 (CNEN, 2014).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar os níveis de concentração do gás radônio de argamassas de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso fornecidos por indústria cimenteira do estado do Paraná.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Determinar a resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas estudadas.
- Avaliar a porosidade das amostras por meio de raios X.
- Realizar a caracterização elementar e quantitativa dos corpos de prova.
- Determinar a concentração de radônio em corpos de prova.
- Relacionar os resultados da concentração de radônio com um ambiente de convívio humano.
- Comparar os resultados com os limites estabelecidos por normas e regulamentos nacionais e internacionais.
- Verificar se a exposição estimada pode ser prejudicial à saúde dos indivíduos.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em cinco capítulos, como exposto a seguir:

O capítulo 1 refere-se à introdução, onde o tema da pesquisa é apresentado, além das motivações e dos objetivos geral e específico.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica composta pela revisão feita na literatura necessária para a elaboração da metodologia.

O capítulo 3 expõe a metodologia por meio dos materiais utilizados no processo e a forma como foram preparados no desenvolvimento da pesquisa.

O capítulo 4 mostra os resultados e discussões de acordo com as análises das medidas realizadas, comparando com normas e regulamentos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões a partir das análises feitas e as sugestões de trabalhos futuros.

A finalização do trabalho é representada pelas referências utilizadas, pelo apêndice e pelos anexos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será abordada uma breve revisão sobre a radioatividade natural, as propriedades do gás radônio e sua origem, principalmente sobre os materiais de construção como o cimento Portland, fosfogesso e gesso natural e a relação do radônio com os efeitos biológicos nos indivíduos.

### 2.1 Radioatividade Natural

Os seres humanos são expostos à radiação ionizante proveniente de fontes naturais que se originam principalmente do espaço sideral e da crosta terrestre. Há em torno de 3400 núclídeos presentes na natureza, dentre eles aproximadamente 70 são radioativos e, em geral, são elementos pesados. Todos os elementos com número atômico superior a 80 apresentam radioisótopos, e todos os isótopos dos radionuclídeos com número atômico maior que 83 são radioativos (UNSCEAR, 2000; EISENBUD e GESELL, 1997; NNDC, 2015).

De acordo com a UNSCEAR (2000), os raios cósmicos produzidos no espaço sideral, quando estão a caminho da Terra colidem com elementos atmosféricos gerando várias interações e produtos de reação secundária. Estas interações também produzem os cosmonuclídeos, que são núcleos radioativos, como por exemplo, o trítio ( $^3\text{H}$ ), berílio ( $^7\text{Be}$ ), carbono ( $^{14}\text{C}$ ) e sódio ( $^{22}\text{Na}$ ).

Os elementos radioativos primordiais são aqueles originados da crosta terrestre e estão presentes no solo, nos materiais de construção, nas águas subterrâneas, no ar e no organismo dos seres humanos (UNSCEAR, 2000; EISENBUD e GESELL, 1997). Somente os radionuclídeos que têm o tempo de meia-vida próximo ao tempo de existência da Terra existem em grandes quantidades. Têm-se como principais exemplos de radionuclídeos primordiais os produtos do decaimento do actínio ( $^{235}\text{U}$ ), urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e do tório ( $^{232}\text{Th}$ ), e o potássio ( $^{40}\text{K}$ ) que ocorre isoladamente, ou seja, não tem origem do decaimento do  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  (UNSCEAR, 2000). Além desses elementos, há a presença do rubídio ( $^{87}\text{Rb}$ ), lantânio ( $^{138}\text{La}$ ), samário ( $^{147}\text{Sm}$ ) e lutécio ( $^{176}\text{Lu}$ ) que também são produtos da série do  $^{235}\text{U}$  (meia-vida de  $7 \times 10^8$  anos), porém apresentam baixa dose de exposição aos indivíduos (UNSCEAR, 2000; EISENBUD e GESELL, 1997).

Segundo a UNSCEAR (2000), a exposição à radiação pode acontecer de duas formas, exposição interna e externa. A exposição interna ocorre devido a inalação e a ingestão de radionuclídeos. Partículas resultantes do decaimento das séries do  $^{238}\text{U}$  (meia-vida de  $4,5 \times 10^9$  anos) e  $^{232}\text{Th}$  (meia-vida de  $1,4 \times 10^{10}$  anos) podem unir-se a poeira do ambiente e serem inaladas pelas pessoas que circulam no ambiente (UNSCEAR, 2000). O elemento de grande importância para a inalação é o produto do decaimento rápido do gás radônio. No caso dos alimentos e da água potável quando são ingeridos, provocam a exposição do ser humano por conter os componentes produzidos pelas cadeias do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  e do  $^{40}\text{K}$  (UNSCEAR, 2000). As séries de decaimento radioativo provenientes das séries do urânio, actínio e tório são apresentadas na Figura 1, juntamente com os respectivos tempos de meia vida de cada elemento e a partícula que é emitida nesse processo (NNDC, 2015). Nos frutos do mar há a predominância do elemento polônio ( $^{210}\text{Po}$ ). Em nível mundial, o  $^{210}\text{Po}$  encontra-se nas seguintes concentrações: 2,4 Bq/kg em peixes, 6 Bq/kg em crustáceos e 15 Bq/kg em moluscos (EISENBUD e GESELL, 1997).

A exposição externa ocorre ao ar livre (*outdoor*) onde a radiação exala do solo devido aos radionuclídeos que o compõe (UNSCEAR, 2000). Em ambientes internos (*indoor*) há uma contribuição maior, em relação à externa, da radiação gama proveniente dos materiais de construção. Neste ambiente a exposição é muito maior que a exposição externa, pois deve-se considerar o tempo que o indivíduo permanece neste local (UNSCEAR, 2000; EISENBUD e GESELL, 1997). As casas feitas de madeira têm menor quantidade de exposição que ao ar livre (UNSCEAR, 2000). A concentração do radônio em ambientes internos depende da quantidade de  $^{226}\text{Ra}$  presente no solo, da permeabilidade do solo, da diferença da pressão interna e da externa, e da taxa de ventilação no ambiente (UNSCEAR, 2000; EISENBUD e GESELL, 1997).

No Brasil, as regiões que apresentam elevado nível de radiação de fundo (*background*) são Guarapari, localizada no Espírito Santo, onde há depósitos de areias monazíticas com grande quantidade de tório e Poços de Caldas, em Minas Gerais, cujos solos são vulcânicos (UNSCEAR, 2000).

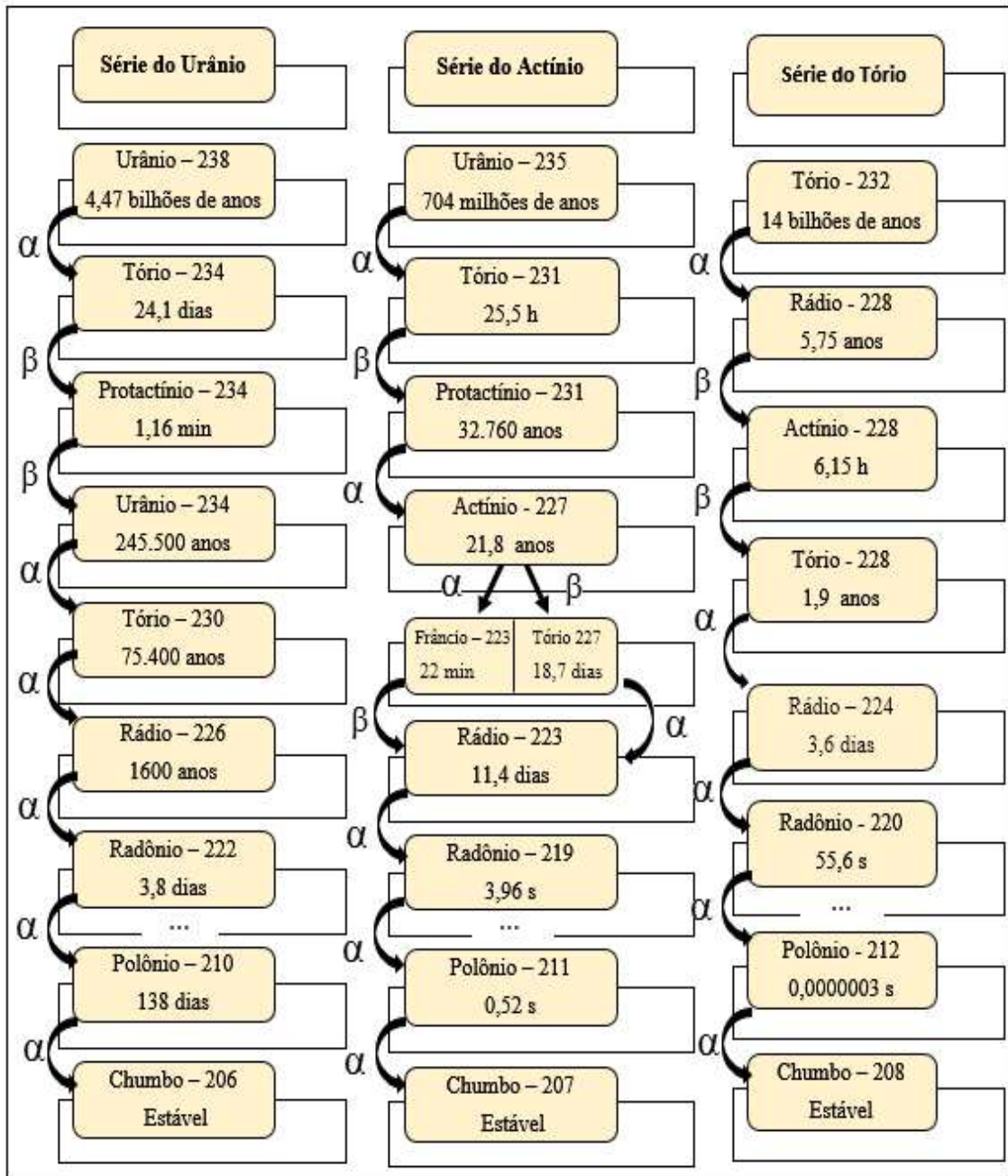


Figura 1 - Séries radioativas do urânio, actínio e tório  
Fonte: Adaptado de NNDC (2015).

Segundo Cigna (2005), o radônio tem diversos isótopos, porém somente três deles ocorrem naturalmente. O  $^{220}\text{Rn}$ , também denominado torônio, origina-se do decaimento do tório, o  $^{222}\text{Rn}$  da série do urânio e o  $^{219}\text{Rn}$ , chamado actinônio, da série do actínio. Dentre estes isótopos o  $^{222}\text{Rn}$  e o  $^{220}\text{Rn}$  são de maior importância para a proteção radiológica, devido a sua meia-vida maior (CIGNA, 2005). O  $^{219}\text{Rn}$ , cuja meia-vida é 3,9 segundos, deriva da série do actínio que inicia com o  $^{235}\text{U}$ , o qual representa somente 0,72% do urânio natural. Estas duas características justificam a menor atenção a este radionuclídeo. Mesmo que haja grande concentração de  $^{235}\text{U}$ , o que pode acontecer com o urânio altamente enriquecido, o  $^{219}\text{Rn}$  não é

exalado para o ambiente devido ao seu curto tempo de meia-vida (CIGNA, 2005). No entanto, o  $^{222}\text{Rn}$  de origem no solo é geralmente a fonte principal de radônio no interior dos ambientes. Em contrapartida, o  $^{220}\text{Rn}$  contribui para a exposição representando preocupação em relação a radioproteção, apenas se houver altas concentrações de  $^{232}\text{Th}$  no interior da superfície de materiais utilizados na construção civil (SANTOS, 2010).

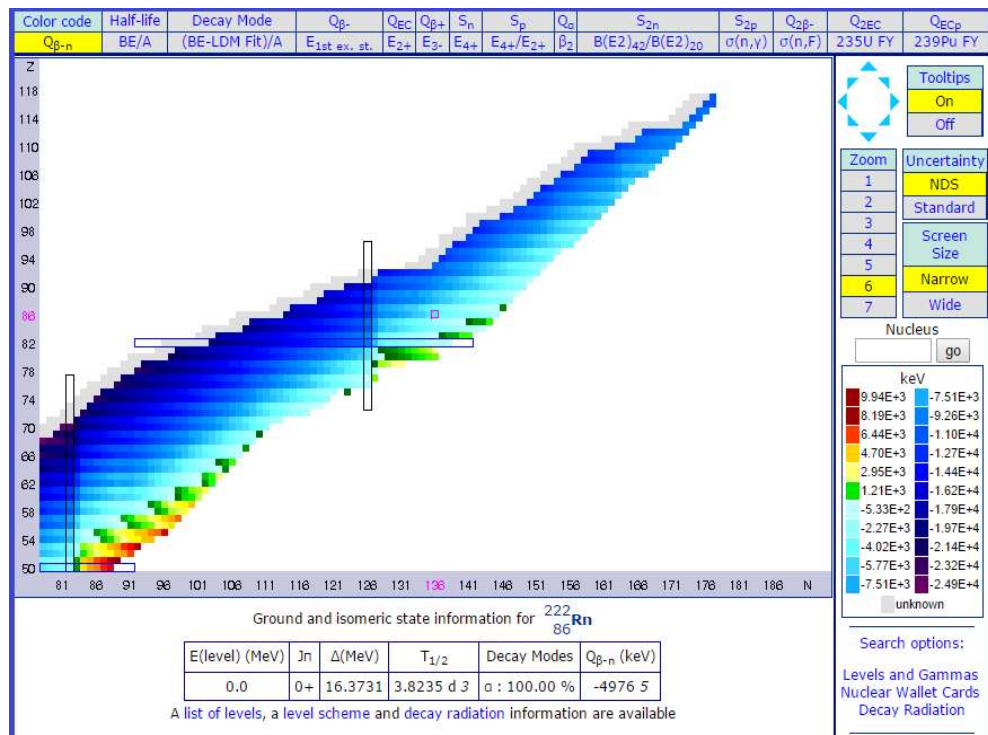
Este trabalho dá ênfase ao gás  $^{222}\text{Rn}$ , por este apresentar maior relevância quanto a proteção radiológica, inclusive em relação ao torônio. Deve-se ressaltar aqui que o torônio ( $^{220}\text{Rn}$ ), de meia-vida de 55 s, tem importância radiológica, todavia, menor que seu isótopo  $^{222}\text{Rn}$ . O isótopo  $^{219}\text{Rn}$ , de meia-vida curta, não tem importância radiológica. As medidas são focadas no  $^{222}\text{Rn}$ , também pelo fato da maior facilidade de detecção e mensuração desse elemento e será detalhado a seguir.

## 2.2 Radônio-222

O radônio é um gás naturalmente radioativo, sem cor, inodoro e insípido. Na tabela periódica é classificado como gás nobre e é 7 vezes mais pesado que o ar. Dessa forma, fica localizado em baixas altitudes, o que facilita sua inalação (EPA, 1999). Devido a essas características se faz necessário o uso de detectores para identificar e quantificar a sua presença (DEL CLARO, 2013).

O radônio origina-se de três séries radioativas naturais, cujos elementos pais (urânio e tório) encontram-se em diferentes quantidades nos solos, rochas, água, concretos e tijolos (WHO, 2004). A partir da desintegração do urânio e do tório, a cada emissão de radiação surgem vários elementos com características diferentes. Um dos produtos é o rádio que ao emitir partículas alfa transforma-se em radônio. O radônio é um radionuclídeo instável e também emite partícula alfa afim de atingir a estabilidade, transformando-se em chumbo, que é um elemento estável, após passar pelo processo de decaimento. Os subprodutos (chamados filhos) do radônio quando inalados são, na maioria das vezes, prejudiciais à saúde dos indivíduos (WHO, 2004; ATSDR, 2012).

As propriedades do radônio, como a energia e tempo de meia-vida, são mostradas na Figura 2 (NNDC, 2015).



**Figura 2 - Propriedades do gás radônio**

Fonte: NNDC (2015).

Antes do final do século XX, a preocupação com a exposição ao radônio era focada nos trabalhadores de minas subterrâneas e não se dava tanta importância para a exposição ao radônio em ambientes (UNSCEAR, 2000). Nos anos de 1970, alguns pesquisadores perceberam que havia índices de exposição bastante elevados em alguns ambientes internos e que chegaram a ser, até mesmo, superiores aos índices das minas. A partir destas constatações foram criados documentos com informações sobre o radônio e a pesquisa sobre radônio *indoor* teve início. Embora ainda haja algumas dificuldades existem muitas pesquisas nessa área (UNSCEAR, 2000).

Depois do cigarro, o radônio é o segundo fator responsável pelo câncer pulmonar. Este elemento quando inalado deposita-se no pulmão e sofre a desintegração, deixando seus produtos que, por sua vez, irão emitir partículas alfa e beta e até mesmo radiação gama. Os quatro produtos do decaimento (filhos) do <sup>222</sup>Rn são o <sup>218</sup>Po, o <sup>214</sup>Pb, o <sup>214</sup>Bi e o <sup>214</sup>Po, cujas meias-vidas são 3,05 minutos, 26,8 minutos, 19,9 minutos e 164 μ segundo, respectivamente (WHO, 2009; UNSCEAR, 2000). As propriedades do radônio e seus produtos de decaimento são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Propriedades do radônio e os produtos do seu decaimento**

Radionuclídeo	Meia-vida	Energia alfa (MeV)	Energia beta (MeV)	Energia gama (MeV)
<sup>222</sup> Rn	3,824d	5,49		
<sup>218</sup> Po	3,05min	6		
<sup>214</sup> Pb	26,8min		1,02; 0,70; 0,65	0,35; 0,30; 0,24
<sup>214</sup> Bi	19,9min		3,27; 1,54; 1,51	0,61; 1,77; 1,12
<sup>214</sup> Po	164s	7,69		
<sup>210</sup> Pb	22a		0,016; 0,061	0,047
<sup>210</sup> Bi	5,02d		1,16	
<sup>210</sup> Po	138,3d	5,3		
<sup>206</sup> Pb	Estável			

Fonte: Santos (2008).

A partícula alfa quando atinge as células de secreção e basal das vias aéreas superiores pode provocar o câncer de pulmão. Isso foi observado em mineradores, porém ainda há dúvidas de que células são mais propensas a desencadear o câncer pulmonar (WHO, 2009; UNSCEAR, 2000).

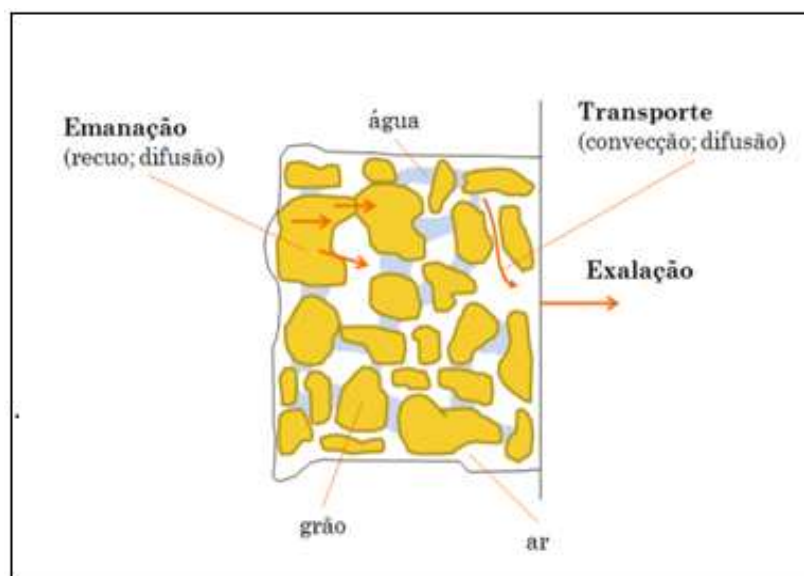
Uma das características do radônio é a sua moderada solubilidade em água e elevada solubilidade em líquidos orgânicos, exceto na glicerina que se comporta menos solúvel que na água. Além disso, tem fácil absorção no carvão vegetal e na sílica-gel (CIGNA, 2005). Devido a essa baixa solubilidade em água o radônio é capaz de mover-se até o ambiente interno (HOPKE *et al.*, 2000). De acordo com UNSCEAR (2000), a concentração do gás radônio que flui do solo para o ar livre ou para o ambiente interno, varia conforme a ventilação do local e em alguns casos pode atingir altos níveis de concentração. Comumente, a emanação e a exalação regulam o transporte de radônio dos materiais.

A emanação ocorre quando o gás proveniente do grão mineral desprende-se e segue para os poros do material ou do solo. No caso do radônio, a emanação surge devido a presença do rádio no material. Geralmente, o coeficiente de emanação é medido com o material dentro de um recipiente hermeticamente fechado. Pode-se definir o coeficiente de emanação ( $f$ ) como sendo a razão entre a atividade do radônio que sai do material ( $n_1$ ) e a atividade do rádio dentro do material ( $n_0$ ). Logo, essa relação pode ser representada pela equação (1) (KOVLER *et al.*, 2005).

$$f = Rn_{(n_1)}/Ra_{(n_0)} \quad (1)$$



Costa (2011), citando Sakoda (2011), afirma que muitos fatores podem interferir na emissão de radônio, como a disposição do rádio nos grãos, a granulometria e o formato, a proporção de umidade, a temperatura, a pressão atmosférica, a porosidade tanto interna quanto externa, os danos provocados pela radiação e a densidade sólida (estrutura cristalina e elementos). Esses fatores são responsáveis pelo controle do recuo e do comprimento de difusão do radônio no interior dos grãos, ou seja, haverá a emissão se o radônio for transportado para o poro e não recuar (Figura 3) (COSTA, 2011).



**Figura 3 - Transporte do gás radônio através dos poros do material**  
**Fonte: Costa (2011).**

O cimento Portland analisado no trabalho de Kovler *et al.* (2005) apresentou coeficiente de emissão de 7,65%. Segundo Bikit *et al.* (2011) o coeficiente de emissão varia de 1% a 30%. Estes valores dependem do tipo de material de construção. Os materiais que são produzidos por procedimentos que utilizam alta temperatura como, por exemplo, o cimento apresenta coeficiente de emissão que varia de 1% a 2%. Para os materiais que não necessitam desse processo, como por exemplo, a areia, o coeficiente de emissão varia de, aproximadamente, 10% a 20%. Isso ocorre devido a mudança na microestrutura do material por causa da alta temperatura, ocasionando maior exalação do radônio. Portanto, o valor encontrado para o coeficiente de emissão dos materiais significa que de todo o gás radônio que é emanado dos grãos, apenas uma certa porcentagem é exalada para o ambiente (BIKIT *et al.*, 2011).

A exalação é o transporte do gás, proveniente do grão mineral, para a atmosfera. Isso ocorre por meio do processo de difusão, podendo ser medido pelo coeficiente de difusão molecular. O valor desse coeficiente fornece a quantidade dos átomos que difundem através de uma superfície em um determinado intervalo de tempo. A intensidade da exalação depende da quantidade de  $^{226}\text{Ra}$  presente no material, do tamanho dos grãos, da umidade e da porosidade (COSTA, 2011).

Os materiais utilizados na construção civil contribuem fundamentalmente com os níveis de exalação do gás  $^{222}\text{Rn}$ . Portanto, deve-se realizar procedimentos que minimizem a exposição em ambientes *indoor*, como, por exemplo, aumentar a ventilação local (AL-JARALLAH *et al.*, 2005).

A convecção também ocorre nos materiais de construção, porém é menos importante que a difusão devido à baixa permeabilidade desses materiais. Por definição, o transporte convectivo ocorre devido as diferenças de pressão originadas por circunstâncias meteorológicas, em que os fluidos como a água, o ar ou o vapor d'água, localizadas no interior dos poros dos materiais, desempenham o papel de transportador dos átomos do  $^{222}\text{Rn}$  (MELO, 1999; UNSCEAR, 1993).

Os tópicos seguintes abordam, em detalhes, a presença do  $^{222}\text{Rn}$  no solo, nos ambientes *indoor* e nos materiais de construção, bem como os efeitos biológicos da exposição ao  $^{222}\text{Rn}$ .

### 2.2.1 Radônio-222 no solo

O termo solo pode ser definido como um conjunto de corpos naturais presentes na superfície da crosta terrestre composto por estruturas sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicas, minerais, elementos orgânicos, além de matéria viva. O solo é proveniente de processos de intempéries sobre uma base composta de rochas ou sedimentos (EMBRAPA, 2006; GUSMÃO FILHO, 2008).

Os radionuclídeos presentes no solo contribuem para a exposição externa à radiação. Esses níveis dependem do tipo da rocha que origina o solo, ou seja, as rochas ígneas, como o granito, apresentam elevadas concentrações de radiação, enquanto as rochas sedimentares

apresentam níveis mais baixos. Entretanto, existem exceções como alguns xistos e rochas fosfáticas que possuem alto teor de radionuclídeos (UNSCEAR, 2000).

No trabalho de Mazzilli *et al.* (2000), foram analisadas três amostras diferentes de rocha fosfática com o método da espectrometria gama. A média das concentrações de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , foi de 23,67 Bq/kg, 575,33 Bq/kg e 248,33 Bq/kg respectivamente. Para a espectrometria gama considera-se como limites muito baixos de detecção as atividades específicas de 0,17 Bq/kg para  $^{226}\text{Ra}$ , 0,59 Bq/kg para  $^{232}\text{Th}$  e 4,2 Bq/kg para  $^{40}\text{K}$ , para um tempo de contagem de 50.000 s. Portanto, os autores concluíram que as concentrações de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  variaram de acordo com a origem das amostras e a concentração de  $^{40}\text{K}$  é bastante baixa, sendo próxima do limite de detecção do equipamento (MAZZILLI *et al.*, 2000).

A Tabela 2 mostra as concentrações da atividade, em Bq/kg, dos radionuclídeos que compõe os diferentes tipos de rochas.

**Tabela 2 - Concentrações da atividade dos radionuclídeos em diversos tipos de rocha**

Tipos de rocha		Concentrações em Bq/kg		
		$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$
Rochas ígneas	Basalto	300	7-10	10-15
	Máfico	70-400	50;60	60;80
	Sáfico	1;100-1;500	50;60	60;80
	Granito	1,000		70
Sedimentar	Arenito	800	40	50
	Quartzo Limpo	<300	< 10	<8
	Quartzo Sujo	400	40	10-25
	Arcóseo	600-900	10-25	<8
	Areia de Praia	<300	40	25
Carbonadas		70	25	3
Superfície da Crosta	Media	850	36	44
Continental	Solo	400	66	37

**Fonte: Adaptado de Araújo (2003).**

De acordo com a UNSCEAR (2000), pesquisas têm sido desenvolvidas para determinar o *background* de níveis de radionuclídeos provenientes do solo e que interferem na taxa de dose absorvida no ar. Esses radionuclídeos podem ser identificados pelo método da

espectrometria gama, que aponta a presença de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  no solo (MAZZILLI *et al.*, 2000). A Tabela 3 apresenta as concentrações médias, em Bq/kg, desses radionuclídeos presentes no solo de diferentes países.

**Tabela 3 - Concentrações médias da atividade dos radionuclídeos presentes no solo de diferentes países**

(Continua)

Continente	País	Concentração média no solo (Bq/kg)			
		$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$
África	Argélia	370	30	50	25
	Egito	320	37	17	18
América do Norte	Costa Rica	140	46	46	11
	Estados Unidos	370	35	40	35
América do Sul	Argentina	650			
	Bangladesh	350		34	
Ásia Leste	China	440	33	32	41
	Hong Kong	530	84	59	95
	Índia	400	29	29	64
	Japão	310	29	33	28
	Cazaquistão	300	37	35	60
	Correia	670			
	Malásia	310	66	67	82
	Tailândia	230	114	48	51
Ásia Oeste	Armênia	360	46	51	30
	Irã	640		28	22
	República Árabe da Síria	270	23	20	20
Norte da Europa	Dinamarca	460		17	19
	Estônia	510		35	27
	Lituânia	600	16		25
	Noruega	850	50	50	45
	Suécia	780		42	42
Oeste da Europa	Bélgica	380		26	27
	Alemanha				
	Irlanda	350	37	60	26
	Luxemburgo	620		35	50
	Holanda			23	
	Suíça	370	40	40	25
	Reino Unido			37	

**Tabela 3 - Concentrações médias da atividade dos radionuclídeos presentes no solo de diferentes países**

(conclusão)

Continente	País	Concentração média no solo (Bq/kg)			
		<sup>40</sup> K	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th
Leste da Europa	Bulgária	400	40	45	30
	Hungria	370	29	33	28
	Polônia	410	26	26	21
	Romênia	490	32	32	28
	Federação Russa	520	19	27	30
	Eslováquia	520	32	32	38
Sul da Europa	Albânia	360	23		24
	Croácia	490	110	54	45
	Chipre	140		17	
	Grécia	360	25	25	21
	Portugal	840	49	44	51
	Eslovênia	370		41	35
	Espanha	470		32	33
<b>Média</b>		<b>400</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>30</b>

Fonte: Adaptado de UNSCEAR (2000).

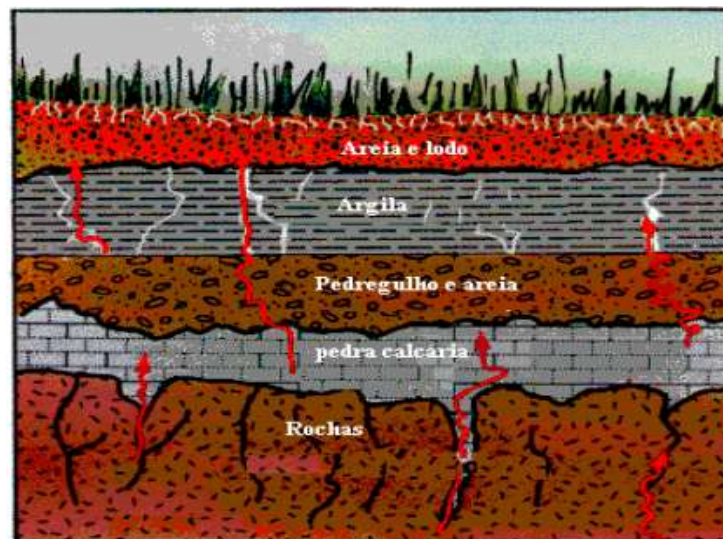
Segundo o levantamento de dados da UNSCEAR (2008) sobre as concentrações de radionuclídeos no solo, em diversos países, encontrou-se as seguintes concentrações médias: 33 Bq/kg para <sup>238</sup>U, 45 Bq/kg <sup>232</sup>Th, 32 Bq/kg para <sup>226</sup>Ra e 412 Bq/kg para <sup>40</sup>K. Entretanto, há uma variação nesses valores, pois há regiões em que as concentrações médias alcançam valores mais elevados como 1000 Bq/kg para <sup>238</sup>U, 360 Bq/kg para <sup>232</sup>Th e 3200 Bq/kg para <sup>40</sup>K (UNSCEAR, 2008).

A contribuição do gás radônio na atmosfera, proveniente do solo, depende da quantidade de pó suspensa no ar. Considerando que a quantidade de pó suspensa na atmosfera é de 50 µg/m<sup>3</sup>, e os níveis de concentração de <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th, no solo, de 25-50 Bq/m<sup>3</sup>, espera-se que a concentração no ar atmosférico proveniente do solo seja de aproximadamente 1-2 µBq/m<sup>3</sup>. No entanto, essa concentração depende do clima, do tipo de solo e da concentração de <sup>238</sup>U e <sup>232</sup>Th no solo (UNSCEAR, 2008).

Dados apresentados pela UNSCEAR 1993 Report mostram os valores representativos das concentrações de radionuclídeos, provenientes do solo, presentes no ar atmosférico. O <sup>210</sup>Pb apresentou a maior concentração (500 µBq/m<sup>3</sup>), seguido do <sup>210</sup>Po (50 µBq/m<sup>3</sup>); <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra,

$^{228}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Th}$  ( $1 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ );  $^{232}\text{Th}$  e  $^{230}\text{Th}$  ( $0,5 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ); e  $^{235}\text{U}$  ( $0,05 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Estima-se que a exposição por meio da inalação dos elementos das séries de decaimento do urânio e do tório representa como dose anual efetiva o valor de  $0,006 \text{ mSv}$  (UNSCEAR, 1993).

O urânio por ser sólido não apresenta a mesma mobilidade que o radônio que é um gás, dessa forma o radônio é capaz de fluir através das fendas ou poros do solo. Portanto, o transporte do gás  $^{222}\text{Rn}$  depende do tipo de solo, se este for permeável, como é o caso da areia, o  $^{222}\text{Rn}$  apresentará maior mobilidade. Entretanto, em solo impermeável, como a argila, a mobilidade será menor (Figura 4) (ARAÚJO, 2003).

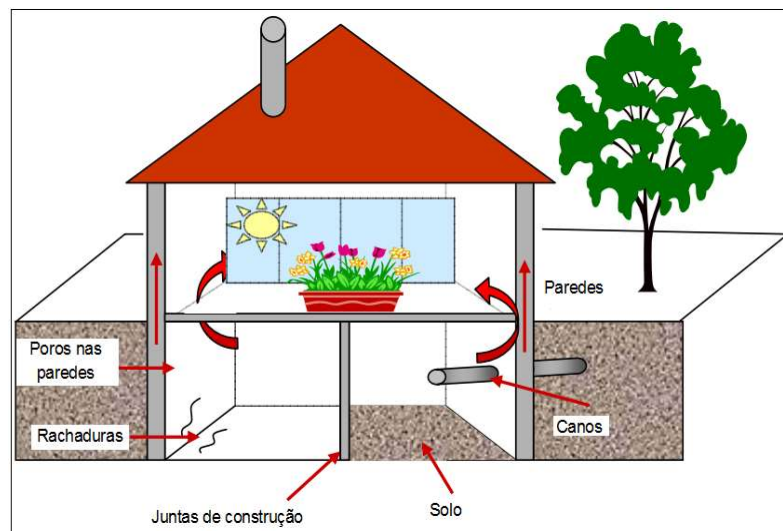


**Figura 4 - Mobilidade dos gases nos diversos tipos de solo**  
Fonte: Araújo (2003).

Lara *et al.* (2011) citando Duval (1993), afirma que o radônio com origem no solo pode representar alta concentração em ambientes de convívio humano. Enquanto os diversos países não apresentam valores de referência para a exposição ao gás radônio, a Suécia estabelece valores referentes ao radônio liberado através do solo. Portanto, a Suécia classifica como baixo risco a exposição ao radônio cuja concentração é de  $10 \text{ kBq}/\text{m}^3$ . Por outro lado, as concentrações entre  $10 \text{ kBq}/\text{m}^3$  e  $50 \text{ kBq}/\text{m}^3$ , embora sejam consideradas como risco “normal”, é fundamental que hajam meios para minimizar a entrada de radônio nas construções. Por fim, classificam-se como alto risco as medidas acima de  $50 \text{ kBq}/\text{m}^3$ , sendo necessário, também, proteção contra a entrada do gás nas residências (LARA *et al.*, 2011).

### 2.2.2 Radônio-222 indoor

O  $^{222}\text{Rn}$  se faz presente em ambientes internos (*indoor*) porque o solo tem radionuclídeos da série do urânio e do tório. Desta forma, esse gás passa pelos poros e rachaduras das paredes, pelas janelas, ao redor de canos e tubulações e em residências que consomem água subterrânea também conhecida como água de poço, pois o radônio pode dissolver e se acumular nesta água, de modo que ao chegar às torneiras e chuveiros o gás desprende-se da água e vai para o ar (Figura 5). Além disso, a composição dos materiais de construção interfere na exalação do  $^{222}\text{Rn}$ . Existe a preocupação com a saúde da população porque alguns ambientes internos têm altas concentrações de radônio, apresentando níveis mais elevados que ambientes externos (WHO, 2004; EPA, 2001).



**Figura 5 - Locais de entrada de  $^{222}\text{Rn}$  em uma residência**  
**Fonte: Adaptado de WHO (2004).**

Em residências a concentração do  $^{222}\text{Rn}$  varia de acordo com a temperatura e a hora do dia, diferença de pressão entre o ambiente interno e externo, permeabilidade do solo, porosidade dos materiais de construção, fissuras presentes na residência, umidade e condução pela água. Além desses fatores, a ventilação também interfere, pois em ambientes fechados a concentração do  $^{222}\text{Rn}$  aumenta. Para obter medidas confiáveis, o ideal é realizar medidas durante pelo menos três meses (EISENBUD e GESELL, 1997; ARAÚJO, 2003).

Devido à preocupação com a exposição dos indivíduos, ao  $^{222}\text{Rn}$ , em ambientes *indoor*, a *World Health Organization* (WHO) recomenda o valor de nível de referência de 100  $\text{Bq}/\text{m}^3$  com o objetivo de minimizar os danos à saúde. No entanto, se esse nível não conseguir ser aplicado em alguns países, por causa das condições locais, o valor estabelecido de 300  $\text{Bq}/\text{m}^3$  pode ser utilizado, porém não deve ser excedido, pois equivale a aproximadamente 10 mSv por ano como apresentado pela *International Commission Radiation Protection* (ICRP) (WHO, 2009).

A ICRP (1993) preconizava os limites de concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  em ambientes *indoor*, sendo que até 200  $\text{Bq}/\text{m}^3$  é um valor considerado normal para a exposição, de 200 a 400  $\text{Bq}/\text{m}^3$  é atenção, de 400 a 600  $\text{Bq}/\text{m}^3$  é remediação e valor superior a 600  $\text{Bq}/\text{m}^3$  é intervenção (ICRP, 1993). Atualmente a ICRP (2014), estabelece o limite de 300  $\text{Bq}/\text{m}^3$  que equivale a dose, em residência, de 1-20 mSv por ano.

A *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) sugere que seja realizada a ação para reduzir a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  quando o ambiente monitorado apresentar valor igual ou superior a 148  $\text{Bq}/\text{m}^3$  (4 pCi/L) (EPA, 2001).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) preconiza, em seu documento, os níveis de intervenção e de ação para situações de exposição crônica do público. Designam-se situações de exposição crônica do indivíduo do público aquelas relacionadas ao uso de materiais de construção que constituem altos teores de elementos provenientes das séries do urânio ou do tório e aquelas ocasionadas pela presença de altos teores de elementos naturalmente radioativos no solo. A CNEN (2005) considera que exposições a doses acima de 10 mSv por ano devem ser sempre avaliadas para posteriormente efetivar medidas de proteção e de remediação. Em casos de dose superior a 50 mSv por ano é indicado a intervenção independente da justificativa (CNEN, 2005).

Em alguns trabalhos realizados no Brasil a concentração média do gás  $^{222}\text{Rn}$ , em ambientes *indoor*, apresenta-se abaixo do valor estabelecido pela ICRP (2014) de 300  $\text{Bq}/\text{m}^3$  (CORRÊA, 2006; GERALDO *et al.*, 2005; DEL CLARO, 2013). Na pesquisa de Marques *et al.* (2006), sete residências, no estado de São Paulo, foram avaliadas. Uma delas apresentou  $610 \pm 55 \text{ Bq}/\text{m}^3$ , excedendo os limites estabelecidos.

A Tabela 4, abaixo, mostra a média mundial de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  em ambientes *indoor*.



**Tabela 4 - Média mundial de concentração de <sup>222</sup>Rn em ambientes *indoor*.**

País	Concentração de <sup>222</sup> Rn (Bq/m <sup>3</sup> )		
	Média aritmética	Média geométrica	Desvio padrão geométrico
Alemanha	49	37	2
Austrália	11	8	2,1
Áustria	99	15	-
Bélgica	48	38	2
Canadá	28	11	3,9
Coréia	53	43	1,8
Dinamarca	59	39	2,2
Eslováquia	87	-	-
Espanha	90	46	2,9
Estados Unidos	46	25	3,1
Finlândia	120	84	2,1
França	89	53	2
Grécia	55	44	2,4
Holanda	23	18	1,6
Hungria	82	62	2,1
Irlanda	89	57	2,4
Islândia	10	-	-
Itália	70	52	2,1
Japão	16	13	1,8
Luxemburgo	110	70	2
México	140	90	-
Nova Zelândia	22	20	-
Noruega	89	40	-
Polônia	49	31	2,3
Portugal	62	45	2,2
Reino Unido	20	14	3,2
República Tcheca	140	44	2,1
Suécia	108	56	-
Suíça	78	51	1,8
<b>Média Mundial</b>	<b>39</b>		

\*OECD – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico  
 Fonte: Del Claro (2013) adaptado de WHO (2009).

### 2.2.3 Radônio-222 em materiais de construção

Anteriormente foi citado que a radiação natural tem origem cósmica e terrestre, mas também pode ser encontrada nos materiais de construção como, por exemplo, nos tijolos, cimento, gesso, concreto, entre outros. Esses materiais são fabricados a partir da matéria-prima proveniente do solo, que contém elementos radioativos da série do urânio e do tório, e o elemento  $^{40}\text{K}$ . A concentração desses elementos varia de acordo com a origem e o tipo da matéria-prima utilizada (CAMPOS, 1994).

Muitos materiais de construção apresentam grande quantidade de  $^{226}\text{Ra}$  e alta porosidade, contribuindo para o aumento da concentração do  $^{222}\text{Rn}$  no ambiente *indoor*, como é o exemplo do concreto leve produzido com xisto de alumínio e o fosfogesso (IAEA, 2003). Há materiais, como o granito, ardósia e rochas vulcânicas, que apresentam mais radionuclídeos em sua composição que o solo (POPOVIC *et al.*, 2006).

Em uma pesquisa realizada pela República Federal da Alemanha, com 30 mil domicílios, foi descoberto que 33% dos ambientes internos apresentaram maior exposição à radiação que os ambientes externos. Ainda que, a radiação externa seja absorvida pelos materiais de construção, deve-se considerar que existem radionuclídeos nestes materiais que contribuem para a exposição no interior dos edifícios. A maioria das pessoas permanecem por longo tempo em ambientes fechados e isso faz com que haja um aumento da dose. A população da República Federal da Alemanha recebe, anualmente, cerca de 40 a 80 mrad, que corresponde a 0,4 a 0,8 mGy para contínua exposição interna. Em ambientes externos a dose absorvida varia de 30 a 60 mrad, que corresponde a 0,3 a 0,6 mGy (EISENBUD e GESELL, 1997).

Em estudos, citados por Popovic *et al.* (2006), foram relatados que as doses efetivas anuais, em ambiente fechado, encontradas para materiais feitos de concreto foram de 0,2 mSv/ano, para materiais constituídos de pedra e para os materiais feitos de fosfogesso foram de 0,8 mSv/ano e para os materiais de painéis de escória a dose efetiva é de 1,7 mSv/ano (POPOVIC *et al.*, 2006). De acordo com a European Commission (1999), em uma residência construída com blocos de concreto composto pelos seguintes elementos, com suas respectivas concentrações médias de atividade,  $^{226}\text{Ra}$  (40 Bq/kg),  $^{232}\text{Th}$  (30 Bq/kg) e  $^{40}\text{K}$  (400 Bq/kg), a dose efetiva anual do ambiente é de 0,25 mSv. Quanto maior a concentração desses radionuclídeos nos materiais de construção, maior será o valor da dose efetiva anual (EUROPEAN COMMISSION, 1999).

O monitoramento dos níveis de concentração de atividade pode ser realizado a partir do índice de concentração de atividade (I), pois permite mensurar a dose que o indivíduo recebe, baseado nos diversos radionuclídeos presentes nos materiais empregados na construção civil. A equação (2) mostra como é realizado o cálculo para determinar o valor de I, onde  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  e  $C_K$  representam as concentrações de atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em Bq/kg, respectivamente (EUROPEAN COMMISSION, 1999).

$$I = (C_{Ra}/300) + (C_{Th}/200) + (C_K/3000) \quad (2)$$

A análise dos resultados do cálculo do I depende do tipo de material e desta forma é feita a estimativa de dose. Se o  $I \leq 0,5$ , a dose corresponde a 0,3 mSv/ano e se o  $I \leq 1$ , a dose corresponde a 1 mSv/ano, ambos valores são utilizados para materiais como o concreto. Para outros materiais e os materiais superficiais como telhas e placas, se o  $I \leq 2$ , a dose corresponde a 0,3 mSv/ano e se  $I \leq 6$ , a dose corresponde a 1 mSv/ano (EUROPEAN COMMISSION, 1999). A norma 3.01 da CNEN determina que o limite de dose anual para indivíduos do público é de 1 mSv (CNEN NN - 3.01, 2014).

Os materiais de construção são responsáveis pela exposição externa e interna dos indivíduos. A exposição externa ocorre devido a radiação gama proveniente de alguns radionuclídeos que compõe os materiais de construção, como o  $^{226}\text{Ra}$ , por exemplo. A exposição interna ocorre pela inalação de gases como o  $^{222}\text{Rn}$  e o  $^{220}\text{Rn}$  e seus produtos de decaimento de curto tempo de meia-vida (UNSCEAR, 2000).

Os materiais de construção feitos de concreto ou residências com fissuras no porão ou na base podem contribuir com o aumento nos níveis de  $^{222}\text{Rn}$  e seus produtos de decaimento (ATSDR, 2012). O aumento da concentração do  $^{222}\text{Rn}$  em ambientes *indoor*, devido aos materiais de construção, pode ser de 10-20 Bq/m<sup>3</sup>, em poucos casos esse incremento pode ser superior a 1000 Bq/m<sup>3</sup>. Os materiais com grande quantidade de  $^{232}\text{Th}$  podem aumentar a concentração de  $^{220}\text{Rn}$  e, conseqüentemente, podem ser uma fonte importante de exposição em ambientes *indoor* (EUROPEAN COMMISSION, 1999).

A Tabela 5 apresenta as concentrações dos elementos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  presentes em matérias-primas empregadas na construção civil, em pesquisas nacionais e internacionais.

Tabela 5 - Concentrações de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em materiais de construção.

(continua)

País/Local	Material	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	Referência
Israel/ Yavne	Areia de quartzo	3-39	3-56	12-1008	HAQUIN, 2008
	Basalto	10-22	10-21	231-420	
	Cascalho	10-33	ND-33	14-9333	
	Calcário	*ND-24	ND-11	ND-205	
	Argila	32-53	41-75	518-843	
	Madeira	ND-10	ND-4	4-166	
	Concreto	18-67	3-43	16-1100	
	Concreto leve	10-60	6-66	51-870	
	Tijolos	7-140	8-127	227-1140	
	Cimento	13-107	7-62	48-564	
	Cerâmica	25-193	29-66	320-1049	
	Granito	ND-160	ND-354	24-2355	
	Azuleijo	33-61	45-66	476-788	
	Mármore	1-63	0,4-142	9-986	
Brasil/ Curitiba	Tijolo vermelho de argila	38,9±1,7	46,1±1,8	188±12	FIOR <i>et al.</i> , 2012
	Bloco de concreto	21,1±0,9	19,7±0,9	737±44	
Brasil/ São Paulo	Placas de fosfogesso tipo 1	15,9±0,5	26,1±2,6	<39	COSTA, 2011
	Placas de fosfogesso tipo 2	392±10	253±3	<81	
	Placas de fosfogesso tipo 3	294±3	151±6	<56	
	Tijolos de fosfogesso tipo 1	29,2±6,1	37,3±5,3	14,3±6,6	
	Tijolos de fosfogesso tipo 2	388±4	273±5	12,0±0,8	
	Tijolos de fosfogesso tipo 3	307±2	175±4	8,3±4,1	
	Tijolos de fosfogesso tipo 4	2,8±0,3	1,7±0,3	16,6±4,2	
Brasil/ Cajati	Placas de fosfogesso tipo 1	15,8±0,5	28,9±10,0	<33	VILLAYERDE, 2008
	Placas de fosfogesso tipo 2	16,6±1,7	23,9±3,5	<34	
	Placas de fosfogesso tipo 3	15,6±1,6	25,4±3,3	<39	
Brasil/ Cubatão	Placas de fosfogesso tipo 1	392±20	254±33	<74	VILLAYERDE, 2008
	Placas de fosfogesso tipo 2	392±21	249±13	<81	
	Placas de fosfogesso tipo 3	393±22	255±26	<69	
Brasil/ Uberaba	Placas de fosfogesso tipo 1	292±15	158±24	<52	VILLAYERDE, 2008
	Placas de fosfogesso tipo 2	297±12	145±14	<56	
	Placas de fosfogesso tipo 3	292±10	149±15	<51	

Tabela 5 - Concentrações de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em materiais de construção.

(conclusão)

País/Local	Material	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	Referência
Brasil	Fosfogesso indústria A	699±39	180±27	25±13	SAUEIA, 1998
	Fosfogesso indústria B	101±5	158±37	24±16	
	Fosfogesso indústria C	270±30	185±16	18±1	
	Fosfogesso indústria D	22±2	8±1	<4,2	
	Gesso Natural	1,71±0,03	<0,6	<4,2	
Brasil	Fosfogesso indústria A	695±47	175±23	25±13	MAZZILI <i>et al.</i> , 2000
	Fosfogesso indústria B	100±7	156±38	24±16	
	Fosfogesso indústria C	266±21	174±17	18±1	
Brasil	Fosfogesso indústria A	744±160	226±31	ND	SAUEIA <i>et al.</i> , 2006
	Fosfogesso indústria B	186±50	86±21	ND	
	Fosfogesso indústria C	344±65	204±33	7,7ND	
Brasil	Fosfogesso indústria A	700±38	138±9	<45	SAUEIA <i>et al.</i> , 2005
	Fosfogesso indústria B	350±42	69±4	<45	
	Fosfogesso indústria C	24±3	19±2	<45	
Brasil	Fosfogesso indústria A	850±240	ND	ND	SANTOS, 2002
	Fosfogesso indústria C	360±120	ND	ND	
Brasil	Fosfogesso indústria A	65	30	ND	ROSA, 1997
	Fosfogesso indústria B	184	174	ND	
Brasil	Fosfogesso indústria A	693±50	175±24	24±4	PAES, 2001
	Fosfogesso indústria B	100±4	156±35	24±16	
	Fosfogesso indústria C	265±31	173±12	18±1	
Brasil/ Curitiba	Areia	11,4±0,2	12,2±0,1	620,2±4,5	DEL CLARO, 2013
	Brita azul	22,0±0,3	48,8±0,3	1091,6± 5,6	
	Brita vermelha	36,4±0,4	66,4±0,3	1058,3±5,6	
	Argamassa	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	

Fonte: Adaptado de Del Claro (2013)

\*ND: não definido.

Uma das formas de avaliar o risco que representa a exposição ao  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  a partir dos materiais de construção é calculando o valor da atividade de rádio equivalente ( $R_{\text{eq}}$ ) em Bq/kg. Adquire-se esse valor por meio da equação (3):

$$R_{\text{eq}} = (0,077 \cdot A_{\text{K}}) + A_{\text{U}} + (1,43 \cdot A_{\text{Th}}) \quad (3)$$

Onde  $A_{\text{U}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  e  $A_{\text{K}}$  representam a concentração da atividade dos elementos  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , respectivamente. Os autores sugerem que o valor máximo da  $R_{\text{eq}}$  deve ser de 370 Bq/kg (AL-SULAITI, *et al.*, 2008).

Os materiais analisados neste trabalho são o cimento Portland, o fosfogesso e o gesso natural que serão tópicos apresentados a seguir.

### 2.2.3.1 Cimento Portland

No ano de 2013 a produção mundial de cimento teve um acréscimo totalizando 4.000 mega toneladas. O continente asiático é o maior produtor de cimento e representa 70% da produção mundial de cimento. Apenas a China é responsável por ter produzido 2.300 mega toneladas em 2013, seguido da Índia com a produção de 280 mega toneladas. Na América Latina os países de relevância são o Brasil e o México, com produção de cimento de 1,7% e 0,9% da produção mundial, respectivamente (DNPM, 2014).

A extração da matéria prima para a fabricação do cimento é realizada a partir de jazidas, a céu aberto, por meio do desmonte devido à explosão. As características do cimento dependem dos aspectos geológicos da jazida. Um dos tipos é a pedreira de calcário que é composta, principalmente, por um material muito duro e algumas vezes cristalizado (PEREIRA, 2010).

Ainda de acordo com Pereira (2010), após a extração, os blocos de calcário passam pelo processo de britagem para que sejam reduzidos a dimensões de alguns centímetros e, posteriormente, são armazenados num silo.

As próximas etapas para a produção do cimento acontecem com a moagem, afim de se obter o cru ou farinha crua com componentes e granulometria adequados às normas; e a clinquerização, também denominado como processo de cozedura, que é a fase responsável pelas reações entre os diferentes constituintes da matéria-prima (PEREIRA, 2010).

O cimento Portland pode ser definido como a mistura de calcário e argila, ou outros materiais como a sílica, a alumina e o óxido de ferro. Todos esses materiais são processados em um grande forno rotatório, com temperatura de clinquerização de 1400°C e moídos, originando o clínquer. Depois desse processo, pode ser adicionado o gesso e a água ao clínquer (NEVILLE *et al.*, 2010). O gesso tem a função de regular a taxa de fixação quando é feita a mistura do cimento com água (BRITISH CEMENT ASSOCIATION, 2002).

A reação química do cimento com a água ocasiona o endurecimento gradativo do material tornando-o trabalhável. Essa reação é denominada hidratação e produz calor. Inicialmente a resistência do cimento aumenta e posteriormente esse aumento é menor. Dependendo da presença de umidade o cimento continua a ganhar resistência (BRITISH CEMENT ASSOCIATION, 2002).

De acordo com a NBR-5733/1991, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial é representado pela sigla CP V-ARI, que significa o valor mínimo de resistência à compressão de 34 MPa, isto é, aos 7 dias de idade. Este tipo de cimento é composto, em grande quantidade, por silicatos de cálcio hidráulico e uma ou mais formas de sulfato de cálcio que são acrescentados durante o procedimento na quantia necessária. Além desses componentes, durante a moagem, pode ser adicionado materiais carbonáticos no teor de 0-5% em massa. Os materiais carbonáticos devem conter no mínimo 85% de  $\text{CaCO}_3$ . A Tabela 6 mostra as exigências químicas para a constituição do cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991).

**Tabela 6 - Exigências químicas para o cimento Portland CPV-ARI**

<b>Determinações químicas</b>	<b>Limites (% da massa)</b>
Resíduo insolúvel (RI)	-1,0
Perda ao fogo (PF)	-4,5
Óxido de magnésio (MgO)	-6,5
Trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )	
-quando $\text{C}_3\text{A}$ do clínquer $\leq 8\%$	-3,5
-quando $\text{C}_3\text{A}$ do clínquer $>8\%$	-4,5
Anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ )	-3,0

**Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991)**

Em pesquisa recente, foi realizada a análise elementar do cimento Portland constituído apenas por clínquer, proveniente da Eslováquia, com a técnica de espectroscopia de fluorescência de raios X como mostra a Tabela 7 (ESTOKOVÁ *et al.*, 2013).

Tabela 7 - Componentes químicos básicos do cimento Portland da Eslováquia

Óxidos (%)	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
MgO	2,14	3,82	1,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,91	4,39	4,06
SiO <sub>2</sub>	19,8	19,7	17,8
SO <sub>3</sub>	3,13	3,17	3,25
K <sub>2</sub> O	0,49	0,58	1,15
CaO	63,6	58,2	54,2
TiO <sub>2</sub>	0,23	0,21	0,21
MnO	0,33	0,35	0,33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,73	3,25	2,63

Fonte: Adaptado de Estoková *et al.* (2013).

Além dos elementos apresentados, o cimento Portland é composto por alguns radionuclídeos importantes, como o <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th e o <sup>40</sup>K. Isso caracteriza o cimento, assim como outros materiais de construção, como sendo responsável pela exposição interna e externa, ou seja, a exposição externa ocorre devido a radiação gama emitida por esses elementos e a exposição interna acontece por causa da inalação dos produtos do decaimento desses elementos. O <sup>40</sup>K está presente em grande quantidade em todas as amostras comparando com o <sup>226</sup>Ra e o <sup>232</sup>Th como mostra a Tabela 8 (ESTOKOVÁ *et al.*, 2013).

Tabela 8 - Concentração da atividade de radionuclídeos presentes no cimento Portland

	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	Total
Amostra	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)	(Bq/kg)
1	51,982	5,795	16,98	74,757
2	169,32	13,08	19,84	202,24
3	228,32	9,286	18,15	255,76

Fonte: Adaptado de Estoková *et al.* (2013).



Ainda no mesmo trabalho de Estoková (2013), foi feita uma comparação desses resultados da concentração da atividade dos elementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{232}\text{Th}$  com outros trabalhos realizados por diversos países. Nessa análise é possível perceber que em todas as medidas apresentadas na Tabela 9, o K continua sendo o elemento de maior concentração de atividade (ESTOKOVÁ *et al.*, 2013).

**Tabela 9 - Concentração da atividade dos radionuclídeos presentes em cimentos de diversos países**

País	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)	Referência
Austrália	114,7	51,8	48,1	Beretka e Mathew (1985)
Áustria	210	26,7	14,2	Sorantin e Steger (1984)
Bangladesh	1133	61	80	Roy <i>et al.</i> (2005)
Brasil	564	61,7	58,5	Malanca <i>et al.</i> (1993)
China	173	57	37	Xinwei (2005)
Egito	93	35	19	El-Bahi (2004)
Finlândia	251	40,2	19,9	Mustonen (1984)
Grécia	310	92	31	Stoulos <i>et al.</i> (2003)
Itália	316	46	42	Sciocchetti <i>et al.</i> (1984)
Japão	139	36	21	Suzuki <i>et al.</i> (2000)
Malásia	203,5	81,4	59,2	Chong e Ahmed (1982)
Holanda	230	27	19	Ackers <i>et al.</i> (1985)
Noruega	259	29,6	18,5	Stranden e Berteiz (1980)
Paquistão	272,9	26,1	28,7	Khan e Khan (2001)
Peru	267	41	26	Turhan (2008)
Eslováquia	149,9	9,39	18,3	Estoková <i>et al.</i> (2013)

Fonte: Estoková *et al.* (2013).

No Brasil, o cimento avaliado pelo espectrômetro gama apresentou as seguintes concentrações: 61,7 Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ ; 58,5 Bq/kg de  $^{232}\text{Th}$  e 564 Bq/kg de  $^{40}\text{K}$ , resultando em rádio equivalente no valor de 188,8 Bq/kg (MALANCA *et al.*, 1993). Comparando os valores da Tabela 9, nota-se que o cimento brasileiro contém radionuclídeos com atividade específica mais elevada que o cimento eslovaco. O rádio equivalente ( $Ra_{eq}$ ) do cimento da Eslováquia ( $Ra_{eq} = 47,1$  Bq/kg) é quatro vezes menor que o rádio equivalente do cimento brasileiro.

### 2.2.3.2 Fosfogesso

O fosfogesso é um subproduto de gesso proveniente de indústrias de fertilizantes (CANUT, 2006). Devido à presença de resíduos de fósforo (0,7% a 0,9%) na sua constituição, o gesso recebe o nome de fosfogesso (UNSCEAR, 2000; CANUT, 2006). Este resíduo é originado a partir do ataque químico do ácido sulfúrico sobre a rocha fosfática para a produção do ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ). Este ácido é amplamente utilizado como matéria-prima principal na fabricação de fertilizantes fosfatados (MATOS, 2011).

A produção mundial de rocha fosfática no ano de 2013 foi maior que de 2012, visto que somente três países, China, Estados Unidos e Marrocos (abrangendo o Saara Ocidental), representam 70% da fabricação mundial. O Brasil é responsável por 3,0% da produção de rocha fosfática. As reservas mundiais apresentam, predominantemente, rochas sedimentares com teores de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) entre 25% e 33%. Por outro lado, as reservas do Brasil ocorrem em rochas ígneas carbonatíticas com teores médios de  $P_2O_5$  que equivalem a 10-11% (DNPM, 2014).

Segundo a DNPM (2014), em 2013 o Estado de Minas Gerais produziu 49% do fosfato nacional, Goiás com 36%, São Paulo com 10%, Bahia com 4% e Tocantins com 1%. Tapira é um município localizado em Minas Gerais e é o maior produtor de rocha fosfática no Brasil (DNPM, 2014).

A obtenção do ácido fosfórico ocorre com diferentes temperaturas durante a reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfática. Desta forma, o sulfato de cálcio ( $CaSO_4$ ) produzido nesta etapa, como um resíduo, pode apresentar-se em três diferentes formas: di-hidratado, hemi-hidratado e anidro (MATOS, 2011).

A Tabela 10 mostra os processos de produção do ácido fosfórico, a temperatura utilizada durante o processo, a concentração de  $P_2O_5$  e a quantidade de fosfogesso gerado para cada tonelada de  $P_2O_5$  produzido.

**Tabela 10 - Processo de produção do fosfogesso**

<b>Processo</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (%)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Fosfogesso (t)</b>
Di-hidratado (DH)	28-30	70-80	4,9
Hemi-hidratado (HH)	38-42	93-132	4,3
Hemi-di-hidratado (HDH)	40-52	90-100	4,3
Anidro	50	120-130	3,5

**Fonte: Matos (2011)**

O processo di-hidratado é bastante utilizado mundialmente por ser mais simples e de baixo custo se comparado aos outros processos. As principais indústrias brasileiras de fertilizantes utilizam esse método. Além de ser o mais empregado nos Estados Unidos. As desvantagens são o baixo rendimento na produção de ácido fosfórico e a grande concentração de impurezas no fosfogesso produzido ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), como o ácido fosfórico e sulfúrico e de metais pesados (MATOS, 2011).

O processo hemi-hidratado (HH) é utilizado na África, Europa e Japão. O fosfogesso obtido por esse processo,  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , contém menor concentração de impurezas que o fosfogesso di-hidratado. Por outro lado, devido ao uso de altas temperaturas o consumo de energia também é maior (MATOS, 2011).

Ainda de acordo com Matos (2011), algumas indústrias europeias e japonesas utilizam o processo hemi-di-hidratado (HDH) que é a junção de duas técnicas, o processo di-hidratado e hemi-hidratado, proporcionando maior produção de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e baixa concentração de impurezas no fosfogesso obtido. Outra vantagem é a economia de energia, porém os gastos com a manutenção dos equipamentos são superiores aos equipamentos empregados no processo di-hidratado (MATOS, 2011).

Diferente dos outros procedimentos, o processo anidro produz um fosfogesso sem moléculas de água,  $\text{CaSO}_4$ , devido à alta temperatura utilizada durante a reação química. Além disso, a quantidade de fosfogesso gerado é menor que a dos outros métodos. O que dificulta o uso desse processo tão vantajoso é o alto custo de produção ocasionado pela rápida corrosão da aparelhagem utilizada na indústria, bem como a alta demanda de energia (MATOS, 2011).

De modo geral, a Figura 6 representa todas as etapas do processo de geração do  $\text{P}_2\text{O}_5$  e a formação do fosfogesso.

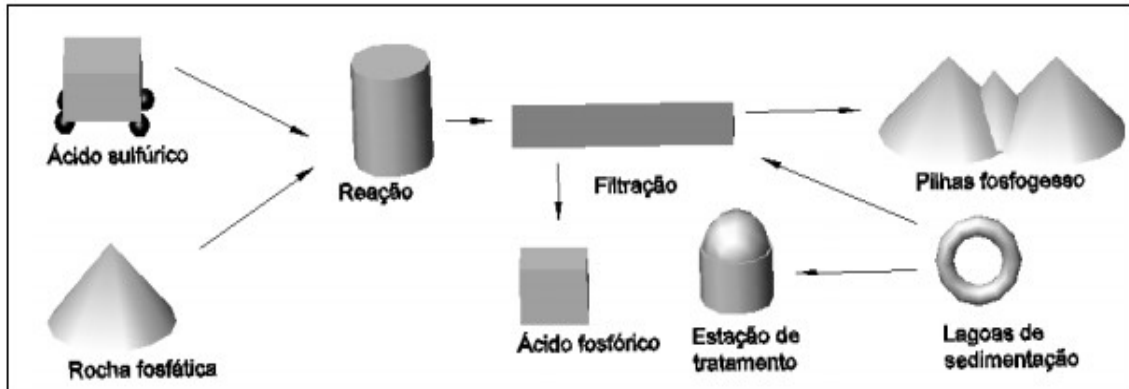


Figura 6 - Etapas da produção de  $P_2O_5$  e formação do fosfógeno  
 Fonte: Canut (2006).

As figuras 7 e 8 apresentam o armazenamento de fosfógeno a céu aberto, sendo que a Figura 7 mostra os lagos de sedimentação de fosfógeno e a Figura 8 mostra as pilhas de fosfógeno.



Figura 7 - Lagos de sedimentação de fosfógeno  
 Fonte: Costa (2011).



Figura 8 - Armazenamento de pilhas de fosfógeno à céu aberto  
 Fonte: Costa (2011).

As pilhas de fosfogesso causam preocupação devido as impurezas presentes em sua constituição, como metais pesados, fluoretos e elementos radioativos. Essas impurezas podem contaminar o solo e águas subterrâneas, além de ocasionar a exposição, interna e externa, dos indivíduos à radiação (COTA, 2012).

No Brasil, a CNEN (2013) criou a Resolução nº 147 que estabelece o nível de isenção para a utilização do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira. Essa resolução surgiu devido à preocupação com a exposição imprópria do público à radiação proveniente desse material. O nível estipulado de isenção de controle da aplicação do fosfogesso nessas duas áreas é o valor limite de 1000 Bq/kg para concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  ou de  $^{228}\text{Ra}$ , para cada radionuclídeo (CNEN, 2013).

Recentemente, a CNEN (2014) publicou a Resolução nº 171 que autoriza a aplicação do fosfogesso em materiais de construção. Entretanto, deve ser utilizada a quantidade recomendada de fosfogesso na mistura com o gesso comum, referente as concentrações máximas de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  presentes no fosfogesso. A Tabela 11 apresenta o percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura (CNEN, 2014).

**Tabela 11 - Percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura de fosfogesso com gesso**

Concentração máxima de $^{226}\text{Ra}$ no fosfogesso (Bq/kg)	Concentração máxima de $^{228}\text{Ra}$ no fosfogesso (Bq/kg)				
	≤400	≤300	≤200	≤100	≤50
	Percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura (%)				
≤50	50	65	85	100	100
≤100	45	50	60	85	100
≤150	35	40	50	65	75
≤200	30	35	40	50	55
≤300	25	30	30	35	40
≤400	20	25	25	25	30
≤600	15	15	15	20	20
≤800	15	15	15	15	15
≤1000	10	10	10	10	10

Fonte: Adaptado de CNEN (2014).

As amostras de fosfogesso e de rocha fosfática, provenientes de uma indústria no Egito, foram caracterizadas por meio das técnicas de EDXRF e de espectrometria gama. A primeira técnica detectou maiores concentrações de Ca, S, Si e P; em menores concentrações

encontram-se Na, Al, Fe e Sr (El-Afifi *et al.*, 2009). A Tabela 12 mostra as concentrações destes elementos que compõe a amostra de fosfogesso.

**Tabela 12 - Análise elementar e quantitativa do fosfogesso por meio da técnica de EDXRF**

Elemento	Concentração (%)	Composição
Na	0,49	Na <sub>2</sub> O
Al	0,23	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Si	5,53	SiO <sub>2</sub>
P	2,05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
S	53,2	SO <sub>3</sub>
Ca	38,4	CaO

Fonte: El-Afifi *et al.* (2009).

A segunda técnica foi utilizada para caracterizar os radionuclídeos presentes nas amostras de fosfogesso e de rocha fosfática. A análise apresentou os elementos <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>232</sup>Th e <sup>40</sup>K na composição do fosfogesso e suas respectivas concentrações médias, em Bq/kg, e o desvio padrão,  $140 \pm 13$ ;  $459 \pm 37$ ;  $323 \pm 28$ ;  $8,3 \pm 0,8$  e  $64,3 \pm 4,1$ . Somente o <sup>226</sup>Ra e o <sup>210</sup>Pb representam 93% da atividade total da amostra. A amostra de rocha fosfática é constituída por <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Pb, <sup>232</sup>Th e <sup>40</sup>K nas seguintes concentrações médias (Bq/kg)  $916 \pm 34$ ;  $890 \pm 29$ ;  $890 \pm 32$ ;  $34 \pm 5$  e  $92 \pm 10$ , respectivamente (Tabela 13) (EL-AFIFI *et al.*, 2009).

**Tabela 13 - Análise elementar e quantitativa do fosfogesso por meio da técnica de espectrometria gama**

Radionuclídeo	Amostras	
	Fosfogesso	Rocha Fosfática
	Concentração média (Bq/kg)	Concentração média (Bq/kg)
<sup>238</sup> U	140±13	916±34
<sup>226</sup> Ra	459±37	890±29
<sup>210</sup> Pb	323±28	890±32
<sup>232</sup> Th	8,3±0,8	34±5
<sup>40</sup> K	64,3±4,1	92±10

Fonte: Adaptado de El-Afifi *et al.* (2009).

### 2.2.3.3 Gesso natural

A gipsita, matéria-prima do gesso, apresenta abundantes reservas na maior parte dos países produtores. A China é o maior produtor de gipsita, 50 mega toneladas, o que representa 31,3% de toda a produção de 2013. Na América do Sul, o país que mais produziu esse mineral em 2013 foi o Brasil, 3,3 mega toneladas, sendo classificado como o 11º produtor mundial representando 2,1% (DNPM, 2014).

O gesso pode ser empregado de duas formas, a natural ou a calcinada. A forma natural é muito utilizada na agricultura e na produção de cimento (BALTAR *et al.*, 2005). Por outro lado, a forma calcinada é aplicada em diversas áreas da construção civil (fabricação de pré-moldados, assim como peças para decoração, placas para forro, blocos de gesso, chapas de gesso acartonado, etc), materiais ortopédicos ou dentais (BALTAR *et al.*, 2005; BERNHOEFT *et al.*, 2011).

De acordo com Pereira (2010), o gesso natural é um aglomerante simples, quando empregado na indústria cimenteira tem a finalidade de reduzir o tempo de pega do material (pasta de cimento, argamassa ou concreto). Isso permite que o profissional trabalhe com o material por mais tempo sem endurecê-lo. Pode ser encontrado na natureza, em grande quantidade, nos terrenos sedimentares. Apresenta-se nas formas cristalizado anidro, também denominado anidrite ( $\text{CaSO}_4$ ) e como sulfato de cálcio hidratado com duas moléculas de água ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), conhecido como pedra de gesso (PEREIRA, 2010).

O Conselho Nacional Do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011, classifica o gesso, no grupo II Classe B, como resíduo reciclável para outras destinações (CONAMA, 2011).

No trabalho de Canut (2006) foi realizada a análise elementar de gesso, encontrado no mercado e de aplicação na construção civil (material de acabamento, revestimento e matéria prima de pré-moldados) com o método de EDXRF. Os resultados obtidos apresentaram os elementos S, O e Ca, além dos elementos traços Si, Al, Mg, K, Zn, Cu, Fe, Mn e Sr (CANUT, 2006). Além desses elementos o gesso natural é composto por alguns radionuclídeos, como o  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ . Nas análises qualitativa e quantitativa, com a técnica da espectrometria gama, do gesso natural empregado na produção do cimento Portland de uma indústria do Paquistão foram detectados o  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  com as seguintes concentrações médias, em Bq/kg,  $8,2 \pm$

1,9;  $16,2 \pm 3,9$  e  $187,7 \pm 53,2$ , respectivamente. Neste mesmo estudo foi calculado o valor do rádio equivalente para o gesso, que resultou em 45,8 Bq/kg. Esses resultados são inferiores ao valor estipulado pela EPA (370 Bq/kg) (ASLAM *et al.*, 2012).

A Tabela 14 mostra os valores da atividade específica total encontrada em amostras de gesso utilizado em diversos países.

**Tabela 14 - Atividade específica total do gesso natural**

<b>País</b>	<b>Gesso natural (Bq/kg)</b>
Austrália	11,1
Brasil	160,3
Canadá	60,0
Finlândia	33,5
México	81,6
Holanda	244
Índia	35,0
Paquistão	212,1

**Fonte: Aslam *et al.* (2012).**

### 2.3 Efeitos Biológicos

As radiações X e gama são ondas eletromagnéticas que apresentam semelhante natureza e propriedades, porém esses dois tipos de radiação têm origem distinta. Os raios X são produzidos artificialmente, ou seja, é necessário que os elétrons da eletrosfera do átomo sejam ejetados. Os raios gama têm origem no núcleo do átomo e apresentam energia maior que a dos raios X, dessa forma apresentam maior poder de penetração (HALL, 2006).

As partículas alfa e beta também são radiações, porém, são diferentes da radiação X e gama, pois não são eletromagnéticas e apresentam menor penetrabilidade (HALL, 2006).

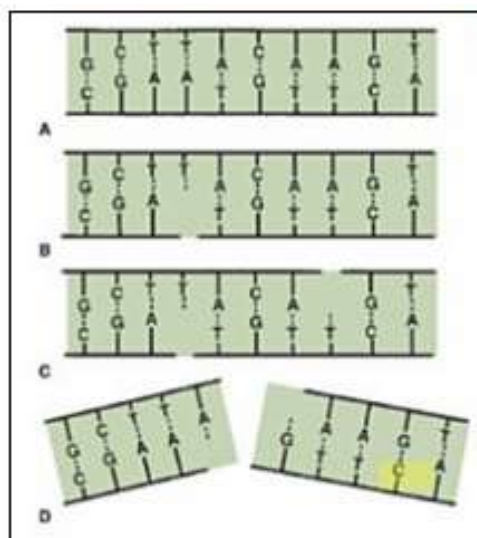
Esses quatro tipos de radiação são ionizantes pois têm a capacidade de ejetar elétrons, tornando o meio ionizado. Quando essas radiações interagem com as moléculas de ácido desoxirribonucleico (DNA) da célula, podem ocorrer os efeitos biológicos (HALL, 2006).



Ainda citando Hall (2006), há dois tipos de interação da radiação com o DNA, a ação direta e a ação indireta.

A ação direta ocorre quando a radiação interage diretamente com as moléculas de DNA e ocasionam a ionização de seus átomos. Esse processo é predominante se a radiação que interagir com o meio apresenta um alto LET (transferência linear de energia), como os nêutrons e as partículas alfa. No entanto, a ação indireta acontece se a radiação interagir com as moléculas presentes na célula, como, por exemplo, as moléculas de água. Essa interação produz radicais livres que posteriormente atingem o DNA (HALL, 2006).

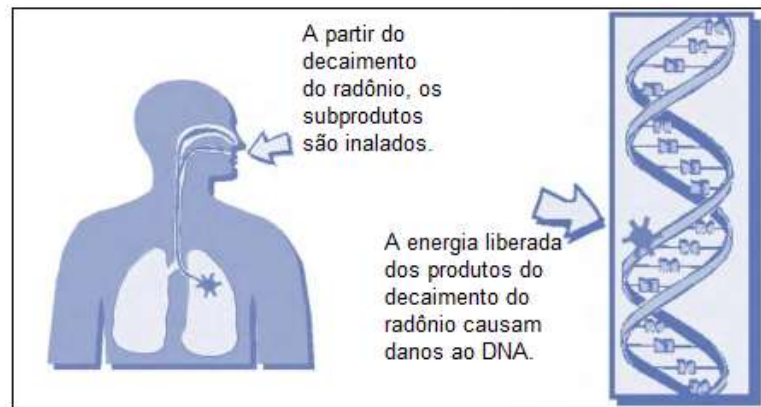
Devido essas interações ocorrem as quebras nas fitas de DNA podendo ocasionar as aberrações cromossômicas. O DNA apresenta uma dupla fita que denomina-se dupla hélice composta pelas pirimidinas (timina e citosina) e pelas purinas (adenina e guanina) como mostra a Figura 9 A. Quando há a exposição à radiação pode ocorrer muitas quebras de uma única fita (Figura 9 B), neste caso essas rupturas não apresentam grande consequência biológica, pois o DNA realiza um reparo utilizando a fita oposta como modelo. Haverá mutação, se acontecer erro no reparo. Na Figura 9 C, o DNA apresenta ruptura nas duas fitas e o reparo acontecerá da mesma forma que o reparo de fita única. Entretanto, se a quebra ocorrer nas duas fitas opostas uma a outra ou os pares forem separados há morte celular, carcinogênese ou mutação (Figura 9 D) (HALL, 2006).



**Figura 9 - Fitas de DNA**  
**Fonte: Hall (2006).**

Um dos elementos naturalmente radioativos, presente no cotidiano dos indivíduos, e que é capaz de ionizar o meio onde interage, podendo provocar danos no DNA, é o radônio (WHO, 2004; UNSCEAR, 2008).

O radônio, por ser um gás, é inalado e os produtos provenientes desse decaimento passam pelas vias respiratórias até os pulmões. Nesse momento, acontece a exposição dos pulmões à radiação, pois o radônio, ao decair, emite partículas alfa. Os produtos do radônio também emitem partícula alfa, além de partícula beta e raios gama (Figura 10). Essa exposição aumenta o risco de câncer pulmonar. Acredita-se que o risco de câncer pulmonar aumenta conforme aumenta a exposição dos indivíduos ao radônio (UNSCEAR, 2000).



**Figura 10 - Inalação do radônio e interação dos seus produtos com o DNA**

**Fonte: Adaptado de EPA (2001).**

Além do radônio, outros radionuclídeos contribuem com a exposição humana quando inalados ou ingeridos. O tório fica aderido, principalmente, ao osso cortical permanecendo por longo tempo. As concentrações de urânio no osso são similares as concentrações de tório. Os elementos rádio e o chumbo também tendem a se aderir ao osso, diferente do polônio que permanece retido nos tecidos moles, como, por exemplo, nos pulmões. O tabaco, da mesma forma, contém chumbo e polônio e, conseqüentemente, aumentando a concentração desses elementos nos pulmões dos fumantes e também o risco de desenvolvimento de câncer quando expostos simultaneamente pelo radônio (UNSCEAR, 2008; ATSDR, 2012).

Com isso, é possível perceber a importância em mensurar as concentrações de gás radônio e, também, de outros radionuclídeos, a fim de evitar a exposição dos indivíduos e minimizar os danos que podem ser causados pela radiação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Primeiramente será abordado a metodologia para a confecção das amostras de argamassa de cimento Portland, fosfogesso e gesso para posterior medida das concentrações do gás radônio. O gesso e o fosfogesso são abordados porque estão presentes na fabricação do cimento. Além das medidas de radônio, foi realizada a caracterização das amostras com o método da espectrometria gama para determinar os principais radionuclídeos que compõe estes materiais ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ ), e a espectrometria por dispersão de energia por fluorescência de raios X para analisar a composição elementar das amostras.

#### 3.1 Materiais e confecção das amostras

Para realizar as medidas da concentração do radônio proveniente do cimento Portland, fosfogesso e gesso natural, fez-se necessário a confecção de amostras desses materiais em argamassas. Desta forma, foi possível simular o modo com que esses materiais são empregados nas construções, considerando a porosidade do material que é responsável pelo transporte do radônio em seu interior o que causa a sua exalação e conseqüente aumento da exposição na atmosfera. Além disso, o uso do material sólido evita a contaminação do equipamento.

A confecção das amostras foi realizada na UTFPR sede Ecoville, no Laboratório de Agregados do Departamento Acadêmico de Construção Civil (DACOC). Os materiais utilizados foram o cimento Portland de alta resistência inicial CPV-ARI, fosfogesso e gesso natural provenientes de uma indústria cimenteira do Estado do Paraná.

Inicialmente foi realizado o preparo das amostras, pois o gesso natural apresenta-se na forma de pedra úmida, como mostra a figura, e precisou ser seco e moído (Figura 11).



**Figura 11 - Gesso natural na forma de pedra**  
**Fonte: Autoria própria.**

O gesso foi seco na estufa (Figura 12 A) à temperatura de 60°C antes de ser moído, pois se apresentasse umidade parte do gesso ficaria aderido no interior do moinho. O gesso foi moído no moinho de bolas de porcelana Solotest pelo modo de Abrasão à Los Angeles (Figura 12 B). O fosfogesso também foi seco na estufa antes da confecção dos corpos de prova.



**Figura 12 - Estufa (A) e moinho de bolas (B)**  
**Fonte: Autoria própria.**

A argamassa foi preparada de acordo com a NBR 7215:1996 produzindo 6 corpos de prova de cada material com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Foram utilizadas quatro dimensões de grãos de areia do IPT com proporção água/cimento de 0,48 (1:3:0,48) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Inicialmente a quantidade

de todos os materiais foram medidas na balança da marca Digimed com resolução de 0,1 g e capacidade de carga de 5 kg, a fim de obter as quantidades para a composição. As quantidades obtidas foram  $468,0 \pm 0,3$  g de cada tamanho de grão de areia IPT (frações fina, média-fina, grossa e média-grossa),  $624,0 \pm 0,4$  g de cimento e  $300,0 \pm 0,2$  g de água. Para confeccionar a argamassa fez-se necessário o uso do misturador mecânico (argamassadeira) da EMIC modelo AG5 composto por uma pá de metal e uma cuba de aço inoxidável com capacidade de 5 L. O misturador opera em duas velocidades (Figura 13).



**Figura 13 - Misturador mecânico sem a cuba**  
**Fonte: Autoria própria.**

Todo o processo realizou-se em etapas. Inicialmente os moldes metálicos cilíndricos são untados internamente com óleo vegetal para facilitar a posterior retirada dos corpos de prova. Para o preparo da argamassa, primeiro colocou-se toda a quantidade de água e cimento, e o misturador foi ligado à velocidade baixa durante 30 s. Posteriormente, sem desligar o equipamento, a areia é colocada, já misturada nas quatro frações, gradualmente, por 30 s. Passando este tempo, o misturador é desligado durante 1min e 30 s. Nos 15 s iniciais, fez-se a raspagem da argamassa aderida à pá e à cuba, com uma espátula, para se obter uma mistura completa. No período restante, a mistura permaneceu em repouso com um pano limpo e úmido cobrindo a cuba. Depois o misturador foi ligado na velocidade alta por 1 min. Após a elaboração da argamassa, esta foi imediatamente colocada, com o auxílio de uma espátula, no molde em quatro camadas. Após a colocação do material de cada camada foi feita a compactação,

utilizando um soquete padronizado, com 30 golpes. Após 24 h os corpos de prova de argamassa de cimento Portland foram desmoldados (Figura 14) de acordo com a NBR 7215 (1996) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).



**Figura 14 - Corpos de prova de cimento Portland**  
**Fonte: Autoria própria.**

No entanto, não foi possível realizar esse mesmo processo para a confecção dos corpos de prova de fosfogesso e de gesso, devido às diferentes características desses materiais. Utilizando as mesmas proporções da argamassa de cimento Portland, substituindo o cimento Portland por fosfogesso ficou muito seca, então foi necessário adicionar mais água para confeccionar os corpos de prova. Mesmo assim os corpos de prova de fosfogesso quando desmoldados, apresentaram-se quebradiços. Na segunda tentativa utilizou-se as mesmas proporções de areia e fosfogesso, porém a relação água/cimento foi de 0,96 ao invés de 0,48. Nesse caso, ocorreu o contrário, a argamassa de fosfogesso não adquiriu a consistência para o enchimento dos moldes, pois a quantidade de água foi muito grande. Para solucionar esse problema acrescentou-se mais areia, sendo 250 g para cada fração, o que totalizou 1 kg. O tempo de desmoldagem foi de uma semana porque o fosfogesso é um material úmido, logo demora mais tempo para secar. Após a desmoldagem, as amostras permaneceram na bancada do laboratório para secar por completo durante duas semanas.

Na terceira tentativa, com a finalidade de reduzir a quantidade de água e aumentar a resistência inicial das argamassas de fosfogesso e de gesso foi adicionado à mistura 5% de aditivo superplastificante sintético MC-PowerFlow 1102. Dessa forma, foi possível realizar a desmoldagem dos corpos de prova em 24h, porém foi necessário deixar os corpos de prova

secando ao ar livre por duas semanas devido a umidade do material. Para a argamassa com gesso natural as mesmas etapas foram seguidas devido as propriedades semelhantes ao fosfogesso, porém a quantidade de aditivo foi maior. A Tabela 15 apresenta os materiais, e suas respectivas quantidades, empregados no preparo dos corpos de prova.

**Tabela 15 - Materiais utilizados na confecção dos corpos de prova**

<b>ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA</b>					
Argamassa de fosfogesso		Argamassa de cimento Portland		Argamassa de gesso natural	
Material	Quantidade (g)	Material	Quantidade (g)	Material	Quantidade (g)
Fosfogesso	509,0	Cimento Portland	624,4	Gesso natural	624,03
Areia fina	381,8	Areia fina	468,2	Areia fina	468,01
Areia média fina	381,8	Areia média fina	468,2	Areia média fina	468,03
Areia grossa	381,8	Areia grossa	468,4	Areia grossa	468,03
Areia média grossa	381,8	Areia média grossa	468,0	Areia média grossa	468,01
Água	244,3	Água	300,0	Água	300,0
Aditivo	12,2			Aditivo	31,07

A Figura 15 mostra a argamassa no molde metálico cilíndrico e os corpos de prova de fosfogesso prontos para a execução das medidas.



**Figura 15 - Argamassa de fosfogesso no molde (A) e corpos de prova de fosfogesso (B)**  
**Fonte: Autoria própria.**

Após a confecção dos corpos de prova foi realizado o ensaio de resistência à compressão como será abordado no próximo item.

### 3.2 Resistência à compressão das amostras

Os corpos de prova foram avaliados quanto a resistência à compressão por meio do ensaio mecânico destrutivo.

Os ensaios foram realizados na UTFPR, sede Ecoville, com o equipamento da marca EMIC modelo DL 30.000 (Figura 16). Os dados da resistência são visualizados no computador por meio do *software* de aquisição TESC.



**Figura 16 - Ensaio de resistência à compressão do corpo de prova**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os testes foram realizados com nove corpos de prova, sendo três para cada tipo de material (argamassas de cimento Portland, de fosfogesso e de gesso natural). Estes foram



centralizados de acordo com o eixo de carregamento da prensa. Foram utilizadas pastilhas de neoprene confinadas no metal para distribuição uniforme da tensão no corpo de prova. Os corpos de prova foram ensaiados com a idade aproximada de seis meses.

### 3.3 Porosidade do material com equipamento de raios X

A análise da porosidade dos corpos de prova de argamassa de cimento Portland, fosfogesso e gesso natural foram realizadas com o equipamento de raios X da marca Gilardoni, modelo FEP ME 990, com dois monitores da marca LG, utilizado para a inspeção de bagagens em aeroportos. Esse equipamento localiza-se na UTFPR, sede Ecoville (Figura 17).



**Figura 17 - Equipamento de raios X para a análise da porosidade das amostras**  
**Fonte: Autoria própria.**

O equipamento foi ligado por meio da chave presente no painel de comando (Figura 18), depois esperou-se por alguns minutos e a exposição das amostras pode ser realizada. O equipamento é padronizado para fornecer um controle automático de exposição. Então, a esteira movimenta-se e acontece a varredura das amostras.



**Figura 18 - Painel de comando do equipamento de raios X**  
**Fonte: Aatoria própria.**

O monitor permite a visualização das radiografias e fornece as imagens em tons de cinza e, também, imagens coloridas. Cada cor representa um tipo específico de componente. Os elementos que apresentam baixo número atômico, como materiais orgânicos e plástico são representados pela cor laranja. Os materiais com médio número atômico, como materiais inorgânicos, metais leves e substâncias amorfas aparecem verde na imagem. A cor azul representa os elementos de alto número atômico, como os metais. Materiais muito densos ou muito espessos que não podem ser distinguidos por nenhuma das cores citadas, são representados pela cor preta. A cor vermelha representa os objetos explosivos e o amarelo representa as drogas.

Neste trabalho, apenas as imagens com tons de cinza foram avaliadas por fornecerem a porosidade do material.

### 3.4 Caracterização elementar e análise quantitativa das amostras

#### 3.4.1 Espectroscopia por dispersão de energia de fluorescência de raios X (EDXRF)

A técnica de espectroscopia por dispersão de energia de fluorescência de raios X (EDXRF) tem a finalidade de realizar análise elementar qualitativa e quantitativa de diversos tipos de amostras que podem ser sólidas ou líquidas metálicas ou não metálicas (BRIENZA, 2002; BUENO, 2001; SILVA, 2002).

Neste trabalho foram utilizados os equipamentos de EDXRF presentes no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR e no Instituto de Física da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), para caracterizar os elementos presentes nas amostras de argamassa de cimento Portland, de fosfogesso e de gesso natural. Inicialmente, os corpos de prova que foram confeccionados para as análises da concentração de radônio, depois foram moídos, umedecidos com ácido etilenodiamino tetra acético (EDTA) e compactados para formar pastilhas delgadas (Figura 19).



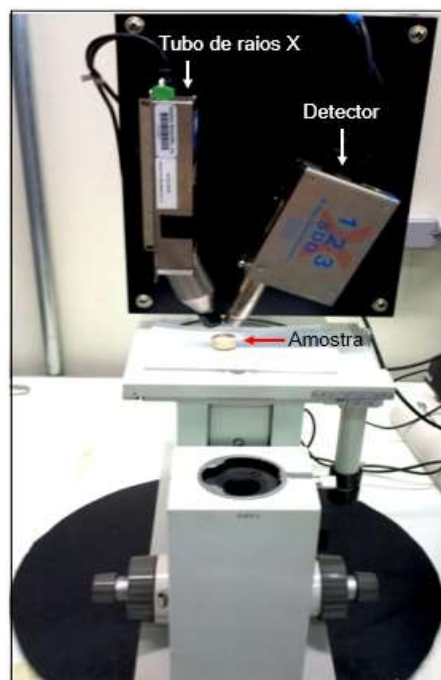
**Figura 19 - Pastilhas de argamassa de cimento Portland, fosfogesso e gesso natural**  
**Fonte: Autoria própria.**

O equipamento presente na UTFPR é composto pelo *kit* com dois tubos de raios X, modelo MINI X, um com alvo de prata (Ag) e outro de ouro (Au), e dois detectores do tipo *silicondrift*, modelo SDD-123, com janela de berílio, ambos da marca Amptek. Esse kit é composto também por alguns acessórios, como os filtros de diferentes tipos de materiais, os colimadores de 1,0 mm e 2,0 mm de diâmetro e o padrão de calibração de aço inoxidável.

O tubo de raios X é conectado ao computador por um cabo USB, permitindo que os parâmetros técnicos sejam selecionados e que os espectros formados sejam analisados. Opera na faixa de 10-40 kV e 5-200  $\mu$ A, o tempo de exposição é determinado pelo operador. O tubo de raios X possui um sistema de resfriamento a ar. A temperatura de armazenamento deve estar entre -25° e 60°C e a temperatura de funcionamento entre -10° e 50°C. Para garantir a segurança do operador o sistema é composto por um LED vermelho que pisca e uma emissão sonora, além de haver um biombo de chumbo em torno do equipamento.

Para a realização da análise das amostras foi utilizado o tubo de Ag e o tubo de Au. Antes da análise das amostras, foi realizada a calibração do equipamento irradiando uma amostra padrão de aço com a técnica, estabelecida pelo fabricante, de 30 kV, corrente de 30  $\mu$ A

e tempo de 60 s. As amostras foram analisadas com a técnica de tensão de 30 kV, corrente de 5  $\mu$ A, colimador de 1,0 mm e distância de 1,0 cm entre o conjunto tubo-detector e a amostra, para ambos tubos de raios X. A Figura 20 mostra o arranjo do tubo de raios X e detector angulados entre si em 45°, fixados em uma placa. Uma das pastilhas foi colocada sobre a base móvel (microscópio óptico). Essa base facilita a análise de diversas amostras pelo fato de movimentar para cima, para baixo e para os lados posicionando a amostra da melhor forma possível.

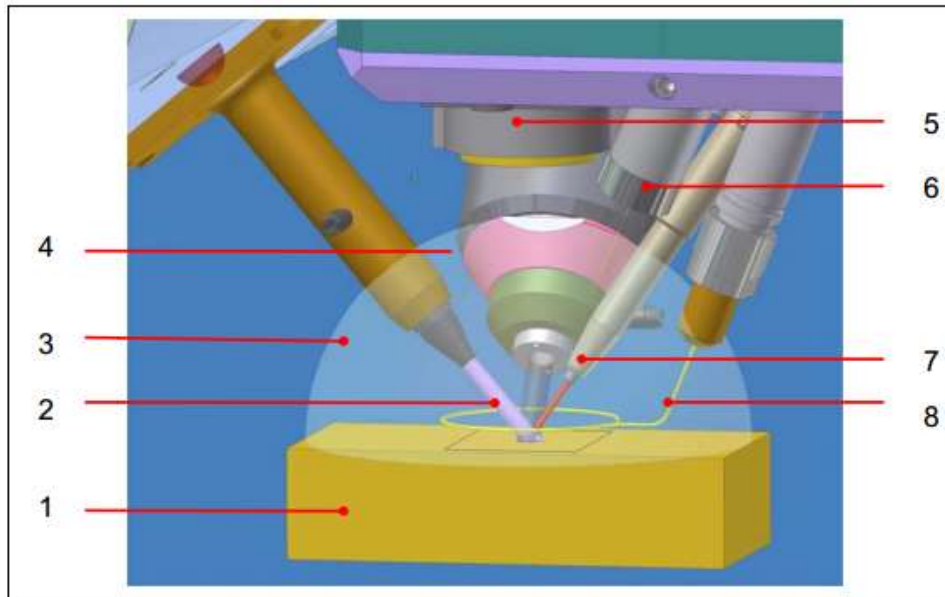


**Figura 20 - Equipamento de EDXRF da Amptek**  
**Fonte: Autoria própria.**

O equipamento utilizado, que pertence a UERJ, foi o ARTAX modelo 200, da BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS, que apresenta tubo de raios X com alvo de molibdênio (Mo) com ângulo de 6°, detector do tipo SDD, sistema de resfriamento a ar e janela de berílio (100  $\mu$ m). Os parâmetros técnicos são de energia máxima 50 kV, corrente máxima 1000  $\mu$ A e potência máxima de 50 W. O monitoramento desses parâmetros é realizado no módulo do controle interno. Todos os parâmetros da fonte de raios X são armazenados na área de memória desse módulo (BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS, 2006).

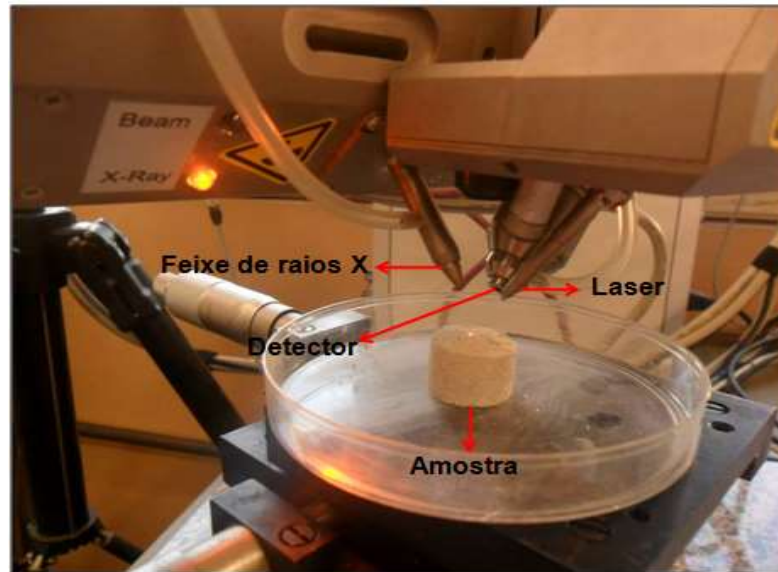
A Figura 21 mostra o esquema de funcionamento do equipamento durante a medida da amostra. A disposição dos componentes forma o princípio de triangulação óptica, cuja

função é ajustar a distância entre a amostra e o cabeçote. O feixe de raios X proveniente do tubo de raios X e o eixo óptico do detector encontram o ponto de medida da amostra no momento em que o ponteiro do laser atinge a amostra (BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS, 2006).



**Figura 21 - Arranjo dos componentes do equipamento de EDXRF ARTAX**  
 1-Amostra; 2-Feixe excitado de raios X; 3-Fluorescência de raios X e radiação espalhada; 4-Radiação registrada pelo detector; 5-Câmera CCD; 6-Iluminação da amostra; 7-Ponteiro do laser para o posicionamento; 8- Sensor de colisão  
 Fonte: BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS (2006).

A técnica utilizada, para a análise das três amostras, foi de tensão 18 kV, corrente 300  $\mu$ A, tempo de exposição de 30 s, colimador de 0,65 mm e a distância entre o tubo e a amostra é fornecida pelo próprio equipamento (Figura 22).



**Figura 22 - Medida da amostra com o equipamento de EDXRF ARTAX**  
**Fonte: Autoria própria.**

O ideal para realizar a análise quantitativa é que antes de medir a amostra, seja realizada a medida de um padrão composto por todos os elementos que deverão ser encontrados na amostra. Entretanto, em condições reais não foi possível devido a inviabilidade da compra do padrão. Neste trabalho a análise foi realizada a partir dos valores encontrados no *National Institute of Standards and Technology* (NIST) e também a partir de outros trabalhos, além dos ensaios fornecidos pelo próprio fabricante.

De acordo com o NIST a composição do cimento Portland é dada pela fração de massa em porcentagem como mostra a Tabela 16.

**Tabela 16 - Composição do cimento Portland**

<b>Elementos</b>	<b>Porcentagem por fração de massa</b>
CaO	64
SiO <sub>2</sub>	20,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,2
SO <sub>3</sub>	2,4
K <sub>2</sub> O	0,7
TiO <sub>2</sub>	0,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12
Na <sub>2</sub> O	0,07
MgO	2,2
Perda ao fogo	1,67

**Fonte: Ferraris *et al.* (2005)**

A técnica de EDXRF é utilizada pela empresa que forneceu as amostras para a realização desse trabalho, com o objetivo de verificar a qualidade do produto. O resultado da análise qualitativa e quantitativa está na Tabela 17 e teste de controle de qualidade completo do cimento Portland é apresentado no ANEXO A.

**Tabela 17 - Concentrações médias, do ano de 2014, dos componentes químicos presentes no cimento Portland**

<b>Componentes</b>	<b>Concentração (%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,37
SiO <sub>2</sub>	19,05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,77
CaO	60,36
MgO	4,93
SO <sub>3</sub>	2,75
Perda fogo	2,93
CaO livre	1,47
Resíd. Insol.	0,73
Equiv AlCal	0,70

Com base nos dados obtidos pelo equipamento da AMPTEK, tanto pelo tubo de Ag quanto pelo o tubo de Au (ANEXO B) foram realizados os cálculos da média das duas medidas da concentração elementar por meio da equação (4).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n p_i y_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (4)$$

Onde y indica a média ponderada dos resultados das medições  $y_i$ , com pesos estatísticos  $p_i$ . O peso estatístico é obtido por meio da equação (5), onde  $\sigma_i$  representa a incerteza na melhor aproximação de i:

$$p_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (5)$$

Após obtida a concentração média, realizou-se o cálculo do erro (equação 6).

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (6)$$

### 3.4.2 Espectrometria gama com detector de germânio hiperpuro - HPGe

Os materiais, em pó, utilizados para a confecção dos corpos de prova foram analisados, separadamente, pelo equipamento de espectrometria gama da marca Canberra (Figura 23), localizado no Laboratório de Radônio do CDTN/CNEN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, em Belo Horizonte, Minas Gerais.



**Figura 23 - Espectrômetro gama localizado no CDTN  
Fonte: Del Claro (2013).**

Este equipamento tem a finalidade de detectar os radionuclídeos emissores de raios gama provenientes das amostras analisadas, como, por exemplo, aqueles que são provenientes da série do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ , além do elemento  $^{40}\text{K}$ . Isso é possível devido a radiação gama apresentar espectros de energias e intensidades características. Neste contexto, o método é importante para a quantificação e caracterização das amostras radioativas, além de identificar diversos tipos de radionuclídeos em uma única análise (SANTOS, 2010).

O espectrômetro gama é composto por um detector semicondutor de germânio hiperpuro (HPGe) de estado sólido que fica no interior de uma blindagem de chumbo. A vantagem em utilizá-lo é a alta eficiência (15%) e resolução, pois permite até mesmo a detecção de pequenas quantidades de radionuclídeos presentes em uma amostra (DEL CLARO, 2013; SANTOS, 2010).



A sala onde o equipamento permanece localizado também apresenta uma blindagem de chumbo e uma coluna de água em torno de toda a estrutura física, a fim de barrar a radiação externa, de modo que esta não interfira na detecção (DEL CLARO, 2013).

A detecção da radiação gama ocorre quando esta atinge os átomos do detector interagindo com os elétrons desses átomos. Essas interações podem ser o efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares (SANTOS, 2010).

O critério para a realização das análises é que as amostras não apresentem umidade, estejam em pó e em um volume de, no mínimo, 600 ml. Após a moagem do gesso natural e secagem, como explicado anteriormente, este e as outras amostras foram peneiradas, lacradas e identificadas com etiqueta adesiva para posterior envio ao Laboratório do CDTN (DEL CLARO, 2013).

As amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso foram depositadas cada uma em um recipiente de vidro de borossilicato, pois assim a amostra é posicionada mais perto possível do detector do equipamento para melhorar a sua eficiência de detecção (DEL CLARO, 2013).

### 3.5 Medidas com o detector AlphaGUARD

Para a realização das medidas de concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  foi utilizado o detector portátil AlphaGUARD produzido pela Saphymo GmbH. Este equipamento opera com alta sensibilidade e rápida resposta linear, na faixa de 2 – 2.000.000 Bq/m<sup>3</sup>. Além de fornecer os valores de temperatura, umidade e pressão (SAPHYMO GmbH, 2014).

Antes de iniciar as medidas foram selecionados nove corpos de prova, sendo três de argamassa de cimento Portland, três de argamassa de fosfogesso e três de argamassa de gesso natural. Os outros corpos de prova foram utilizados para a realização do ensaio de resistência à compressão do material como já abordado no item 3.2.

Essas amostras foram embaladas com filtro de papel descartável, com o objetivo de evitar que partículas se desprendessem dos materiais de construção e contaminassem a câmara de ionização do equipamento. Caso isso tivesse ocorrido as partículas depositadas poderiam decair e modificar os valores mensurados. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em

recipientes de vidro, de aproximadamente 3,3 L, fechados hermeticamente e vedados com silicone, onde permaneceram durante 40 dias, para que o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{222}\text{Rn}$  entrassem em equilíbrio secular. O equilíbrio secular ocorre quando a concentração da atividade do  $^{226}\text{Ra}$  e do  $^{222}\text{Rn}$  é igual (KOVLER *et al.*, 2005). Após esse intervalo de tempo a concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  acumulado nos recipientes foi mensurada com o detector AlphaGUARD, que fica localizado no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR.

As medidas ocorreram em duas etapas devido a quantidade de recipientes de vidro. Há seis desses recipientes e nove amostras. Portanto, em uma etapa foram armazenadas 5 amostras e em um dos recipientes foi colocado o mesmo filtro de papel descartável utilizado para revestir os corpos de prova, para representar o *background*. Na segunda etapa foram armazenadas 4 amostras e um recipiente com o *background*, semelhante a etapa anterior. É importante obter o valor de *background* porque a composição química do papel descartável pode conter radioatividade, assim é possível apresentar os níveis de concentração de  $^{222}\text{Rn}$  apenas das amostras.

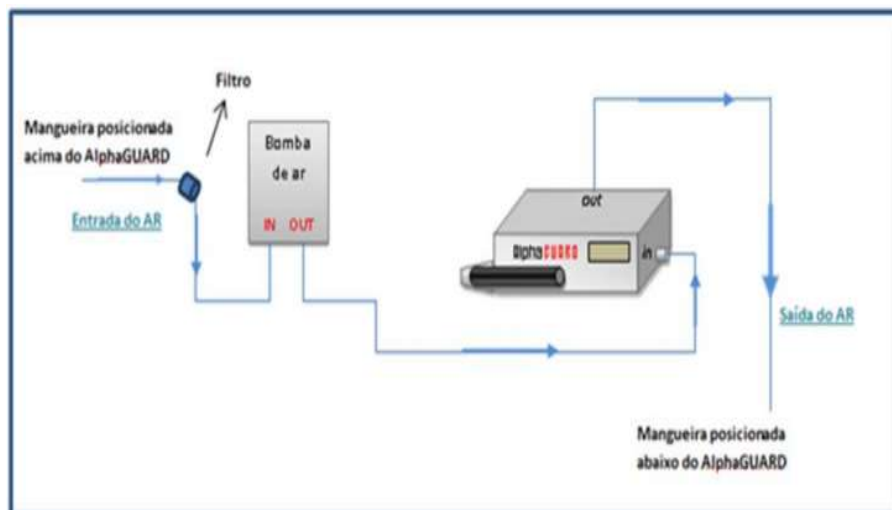
Todos os recipientes são compostos por uma tampa com dois orifícios, onde estão fixados dois tubos de cobre que permitem a entrada e saída de ar do sistema. Na parte externa estão inseridas, nos tubos de cobre, duas mangueiras com conectores de três vias, para manter o frasco totalmente vedado durante os 40 dias e liberar a passagem do ar no momento das medidas (Figura 24). Os conectores têm como função interligar o recipiente ao AlphaGUARD formando um circuito fechado.



**Figura 24 - Recipiente de vidro com a amostra**  
**Fonte: A autoria própria.**

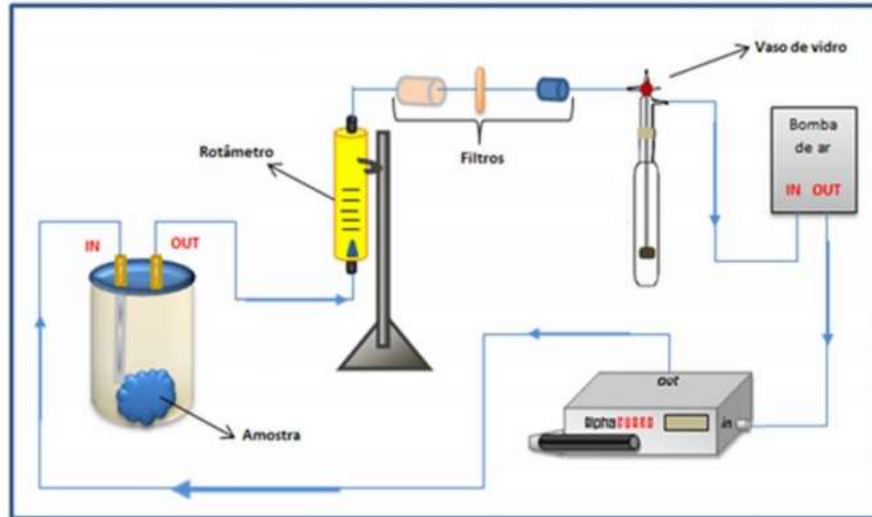
As medidas foram realizadas de acordo com a metodologia estabelecida no trabalho de Del Claro (2013). O procedimento ocorreu em três etapas, a ventilação passiva em circuito aberto, medida do *background* e medida da amostra. Essas etapas foram repetidas para cada amostra. Para todas essas etapas a bomba de ar (AlphaPUMP), que faz parte do equipamento, permaneceu ligada com fluxo de 0,5 L/min e o AlphaGUARD foi operado no modo 1min/flow.

A ventilação ativa é o início do procedimento, pois proporciona a circulação de ar por meio da bomba, durante 40 minutos, com conexão até o AlphaGUARD, este permanece desligado. Isso faz com que o valor do *background* do equipamento seja reduzido e algumas impurezas sejam eliminadas do sistema, contribuindo para as posteriores medidas. Como apresentado na Figura 25, o circuito contém um filtro para barrar as impurezas do ar antes de chegar até a bomba, seguindo para o AlphaGUARD e deste sai para o ambiente.

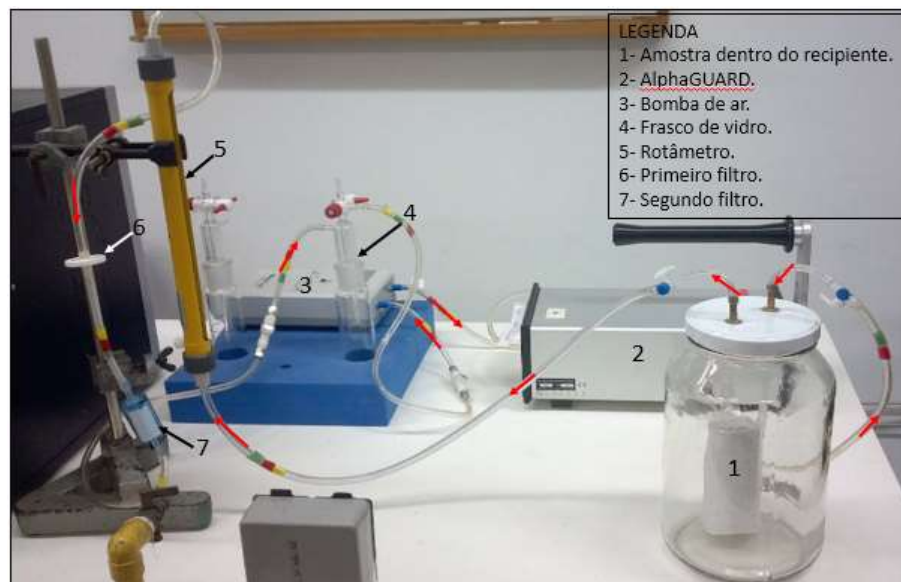


**Figura 25 - Ventilação ativa em circuito aberto**  
**Fonte: Del Claro (2013).**

A próxima etapa compreende a medida do recipiente com filtro de papel descartável (*background*) durante 1 hora, em circuito fechado e com o AlphaGUARD ligado para que os valores medidos sejam registrados. Na Figura 26 observa-se um esquema do sentido do fluxo de ar e a adição de três componentes, o rotâmetro, os filtros e o vaso de vidro. O rotâmetro indica a presença ou não do fluxo de ar e os dois filtros e o vaso de vidro, proveniente do AquaKIT, também pertencente ao AlphaGUARD, são responsáveis por impedir que possíveis grãos desprendidos da amostra entrem na câmara de ionização do equipamento. Essa mesma etapa ocorre com a amostra, porém esta medida tem a duração de 2 horas (Figura 27).



**Figura 26 - Circuito fechado de medida com o AlphaGUARD**  
 Fonte: Del Claro (2013).



**Figura 27 - Medida do corpo de prova com o detector AlphaGUARD**  
 Fonte: Autoria própria.

Para cada medida da concentração do gás  $^{222}\text{Rn}$  nos materiais de construção as três etapas (ventilação ativa, medida do background e medida da amostra) foram realizadas até a análise do último corpo de prova.

Embora a concentração do recipiente do *background* tenha sido medida várias vezes, considera-se apenas a primeira medida para a elaboração dos cálculos. A finalidade em fazer as medidas dos outros recipientes de *background* é verificar se há ou não contaminação do AlphaGUARD devido as amostras. Nesse experimento não ocorreu contaminação pelo fato do sistema estar bem vedado e os corpos de prova bem embalados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos pelas medidas realizadas no desenvolvimento deste trabalho, bem como a comparação destes resultados com o que as normas e regulamentos preconizam.

### 4.1 Ensaio de Resistência à compressão das amostras

O ensaio de resistência à compressão das amostras forneceu a tensão, em MPa, e foi obtida a média aritmética e o desvio padrão (Tabela 18). A análise desses valores dados pelo equipamento precisou de tratamento estatístico, pois deve-se considerar o erro do equipamento. Os relatórios dos ensaios encontram-se no Anexo C.

**Tabela 18 - Resultado do ensaio de resistência à compressão fornecido pelo equipamento**

Corpos de prova	Tensão (MPa)	Média aritmética (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Argamassa de cimento Portland	41,73	33,21	12,64
	39,22		
	18,68		
Argamassa de gesso natural	1,65	1,69	0,061
	1,68		
	1,76		
Argamassa de fosfogesso	1,85	1,59	0,23
	1,42		
	1,51		

O objetivo foi encontrar o valor do erro final, cuja equação (7) é:

$$Erro\ final = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_s^2} \quad (7)$$

Onde  $\sigma_m$  é o erro padrão e  $\sigma_s$  é o erro do equipamento. Nesse caso o erro do equipamento é de 0,45%. O erro padrão é dado pelo desvio padrão ( $\sigma_p$ ) multiplicado pelo valor de correção de *Student's* para três amostras de cada material (1,32) e esse resultado é dividido pela raiz quadrada do número de amostras (N) analisadas, como mostra a equação (8).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_p}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

Onde:

$\sigma_m$  = erro padrão;

$\sigma_p$  = desvio padrão.

N=número de amostras.

Além do cálculo do erro, foi necessário calcular a média para a resistência da argamassa de cimento Portland, pois o valor de 18,68 foi descartado por estar muito distante dos outros valores devido ao erro do ensaio. Portanto, no cálculo do erro padrão foi considerada a distribuição de *Student's*, onde o desvio padrão ( $\sigma_p$ ) foi multiplicado por 1,84.

Os resultados da média da resistência à compressão dos três tipos de amostras e os erros associados são apresentados na Tabela 19.

**Tabela 19 - Média e erro final da resistência à compressão das amostras**

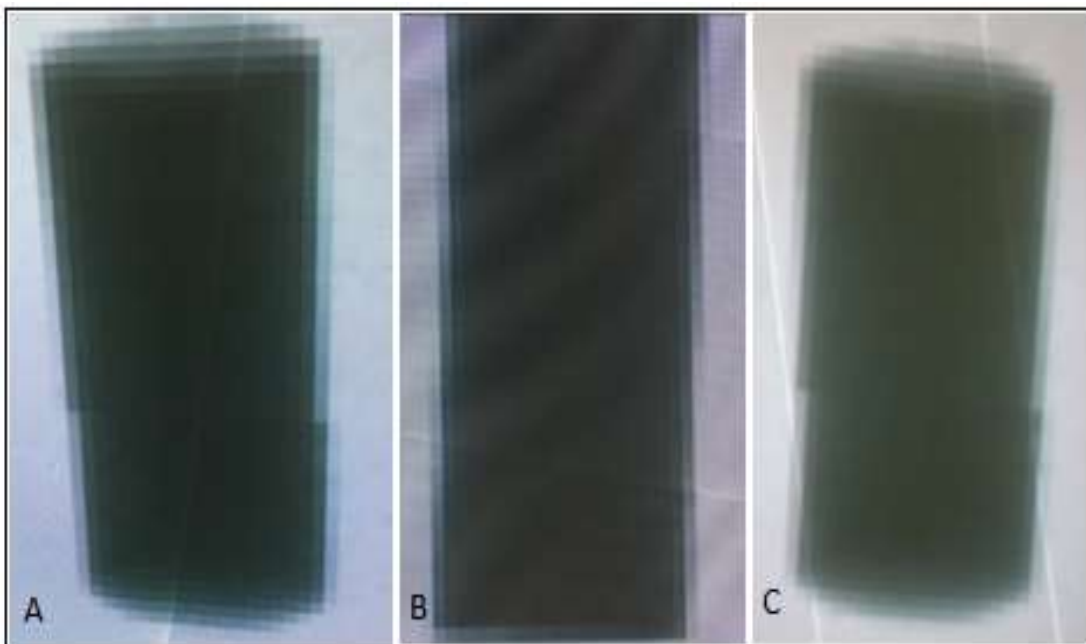
<b>Amostra</b>	<b>Média e erro final (MPa)</b>
Argamassa de cimento Portland	40,5 ± 2,3
Argamassa de gesso natural	1,69 ± 0,04
Argamassa de fosfogesso	1,59 ± 0,17

As amostras da argamassa de cimento Portland apresentaram maiores valores de resistência que a argamassa de fosfogesso e de gesso natural. Devido as propriedades semelhantes do gesso e do fosfogesso, ambos materiais apresentaram valores aproximados de resistência à compressão.

A NBR 7215 recomenda que a repetibilidade do ensaio, ou seja, a diferença entre dois resultados finais do ensaio de corpos de prova com a mesma idade, adquiridos pelo mesmo operador e equipamento, em curto período de tempo, não deve ser superior a 10% da média entre eles (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). Nesse caso, todas as amostras avaliadas estão dentro do limite de 10% da média entre eles.

#### 4.2 Porosidade do material

As imagens formadas a partir da interação dos raios X com as amostras cilíndricas de argamassa de cimento Portland, argamassa de fosfogesso e argamassa de gesso natural mostrou que os três tipos de material são homogêneos, pois toda a imagem radiográfica é representada pelos mesmos tons de cinza. Porém, o método não se apresentou muito eficaz para detalhar os poros existentes. A Figura 28 mostra a radiografia do corpo de prova de argamassa de fosfogesso (Figura 28 A), de gesso natural (Figura 28 B) e de cimento Portland (Figura 28 C).



**Figura 28 - Radiografias dos três tipos de amostras: A) argamassa de fosfogesso; B) argamassa de gesso e C) argamassa de cimento Portland**

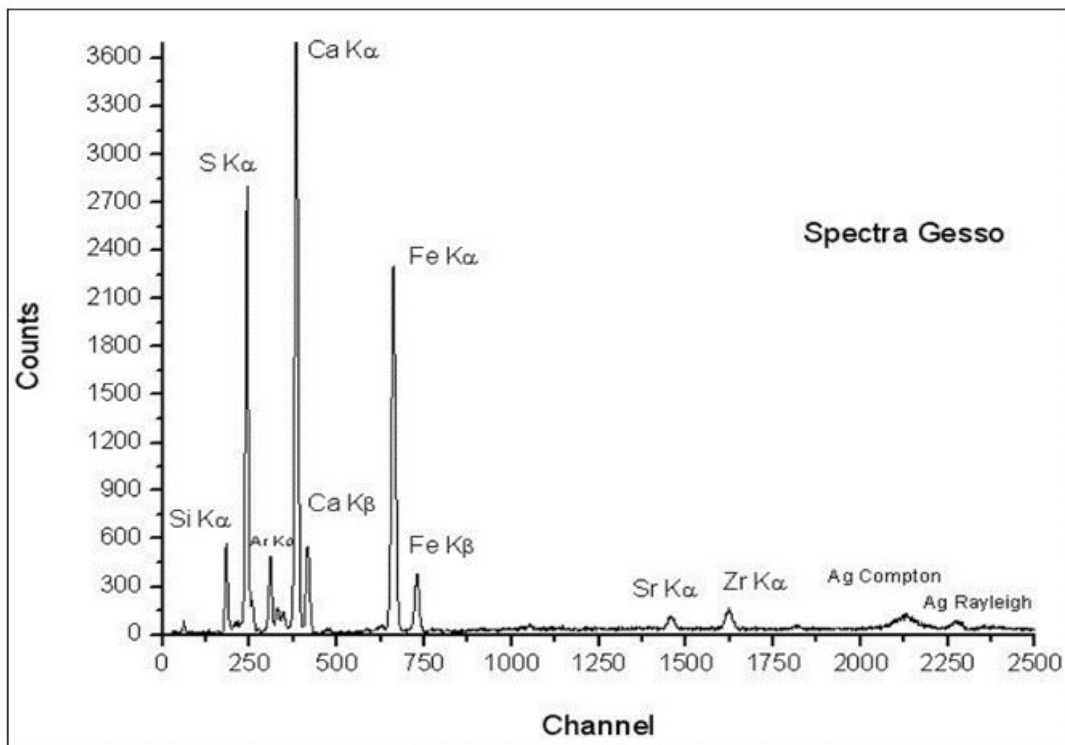
**Fonte: Autoria própria.**

As imagens não apresentam resolução de qualidade, porque o computador não permite a obtenção dessa imagem em arquivo no momento do ensaio. Dessa forma, as imagens apresentadas no monitor foram fotografadas, mesmo assim não era possível distinguir a porosidade do material.

### 4.3 Caracterização elemental das amostras

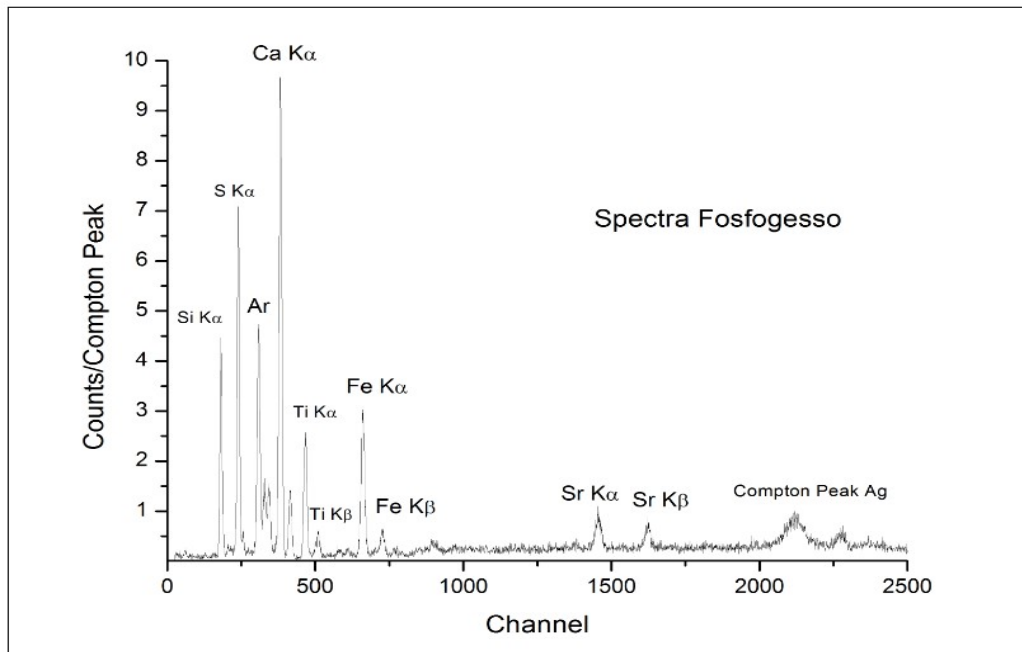
#### 4.3.1. Análise elemental com a técnica de EDXRF

Os resultados apresentados pelo equipamento de EDXRF da Amptek mostram que as pastilhas de argamassa de fosfogesso e de gesso natural apresentam composição química bastante semelhante. Ambos são compostos por Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Sr e alguns elementos traços como o Mn e o Zn. Os espectros, elaborados com o programa Portable Origin 8.5, mostram os picos dos elementos presentes nas amostras de argamassa de gesso natural e de fosfogesso (Figura 20 e 30).



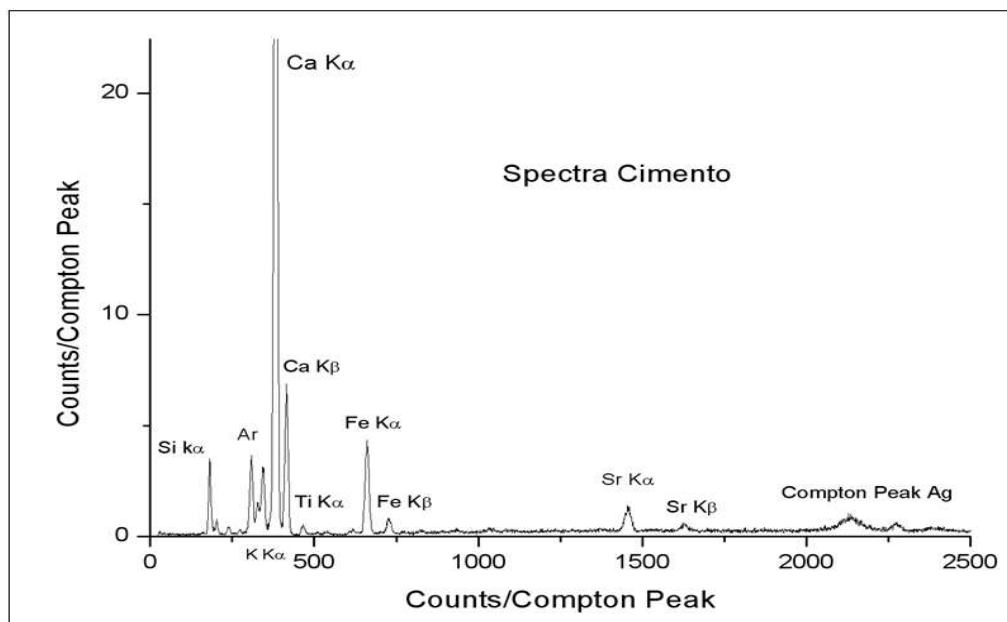
**Figura 29 - Espectro da amostra de argamassa de gesso natural proveniente da medida com o tubo de Ag**





**Figura 30 - Espectro da amostra de argamassa de fosfogesso proveniente da medida com o tubo de Ag**

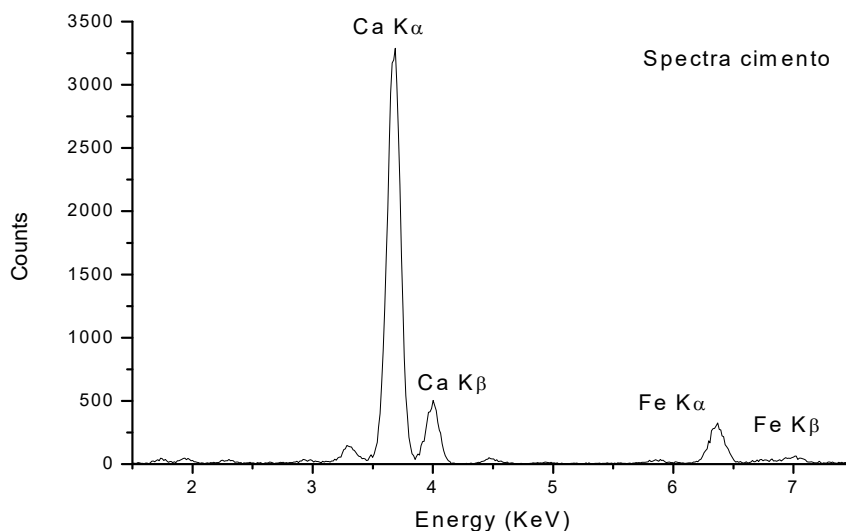
No entanto, na pastilha de argamassa de cimento Portland os elementos detectados são o Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Fe, Sr e alguns elementos traços como o Ni, Cu e Mn. A Figura 31 mostra alguns elementos que compõe o espectro do cimento Portland.



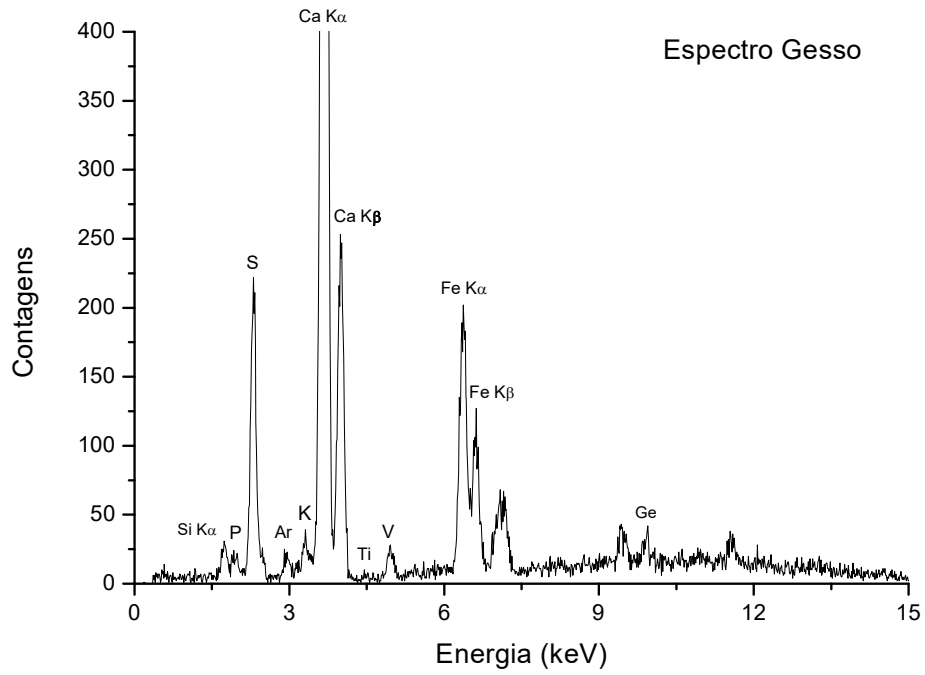
**Figura 31 - Espectro da amostra de argamassa de cimento Portland proveniente da medida com o tubo de Ag**

Os três espectros apresentaram quantidade significativa de *background* por causa da permeabilidade relacionada à porosidade do material das pastilhas.

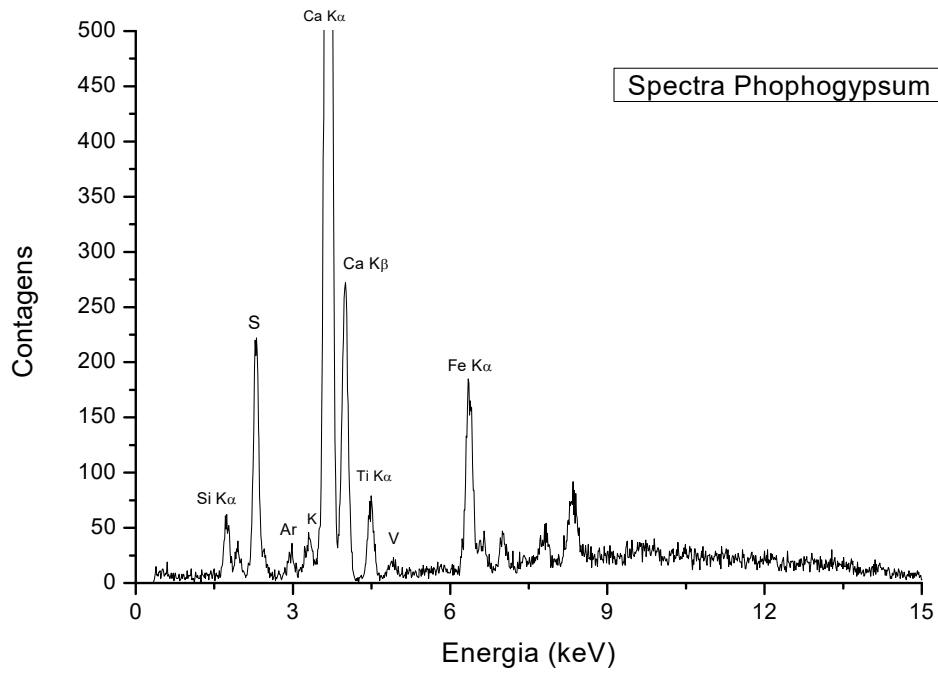
O resultado obtido com o alvo de Mo foi bastante semelhante ao resultado com o alvo de Ag e Au. Porém, alguns elementos foram identificados apenas com os alvos de Ag e Au como o Sr, Mn e Zn nas amostras de argamassa de fosfogesso e gesso natural; e os elementos Ni, Cu, Sr e Cl nas amostras de argamassa de cimento Portland. Entretanto, o alvo de Mo identificou o vanádio (V) nas três amostras e o elemento fósforo (P) nas amostras de argamassa de gesso natural e cimento Portland. O elemento germânio (Ge) foi encontrado apenas na amostra de argamassa de gesso natural, sendo que este elemento pode ser a soma de linhas espectrais de outros elementos (Figuras 32, 33 e 34).



**Figura 32 - Espectro da amostra de argamassa de cimento Portland proveniente da medida com o tubo de Mo**



**Figura 33 - Espectro da amostra de argamassa de gesso natural proveniente da medida com o tubo de Mo**



**Figura 34 - Espectro da amostra de argamassa de fosfogesso proveniente da medida com o tubo de Mo**

Comparando a análise realizada neste trabalho com a composição dos elementos identificados pela empresa cimenteira, observou-se que os elementos Al e Mg que o compõe não foram identificados pela técnica aplicada. É possível que a energia aplicada de 30 kV para os tubos de Ag e Au e 18 kV para o tubo de Mo, não tenham sido suficientes para detectar os dois elementos.

No trabalho de El-Afifi (2009), citado no capítulo 2, a análise da amostra de fosfogesso também apresentou os elementos Si, Ca, Fe e Sr. No trabalho de Canut (2006) a análise do gesso natural mostrou a presença de S, Ca, Si, Zn, Mn, Fe, K e Sr que também foram detectados no presente trabalho. Alguns elementos diferem provavelmente devido a origem das amostras.

Portanto, a técnica de EDXRF, com ambos os equipamentos, permitiu a caracterização elementar. Quase todos os componentes básicos que formam os três tipos de amostras analisadas foram identificados com este método. Além disso, ambas foram técnicas complementares, pois alguns elementos não identificados por um dos métodos pode ser identificado pelo outro, tornando a análise mais completa. Entretanto, será necessário melhorar a técnica para que os elementos Al e Mg possam ser detectados, pois de acordo com o relatório de ensaio do fabricante (Tabela 17), esses elementos estão presentes.

#### 4.3.1.1 Análise quantitativa com a técnica de EDXRF

Com os resultados provenientes dos cálculos apresentados no capítulo 3 foi possível analisar a quantidade de cada elemento presente nas amostras.

A Tabela 20 mostra a análise quantitativa da amostra de argamassa de gesso natural. Os elementos predominantes nesta amostra são o Ca, S e Si o que condiz com a composição básica do gesso natural como abordado no capítulo 2, item 2.2.3.3.

**Tabela 20 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de gesso natural**

<b>Elemento</b>	<b>Fração de massa (mg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Erro</b>
Ca	43,41	0,45
S	33,8	0,8
Si	18,9	1,2
Fe	3,327	0,067
K	0,85	0,11
Ti	0,251	0,040
Sr	0,235	0,020
Mn	0,096	0,022
Zn	0,015	0,009

Nas amostras de argamassa de cimento Portland os elementos predominantes são o Ca e Si. A grande quantidade de Ca deve-se ao principal elemento encontrado no cimento Portland, o calcário (CaCO<sub>3</sub>) que é a matéria prima deste material. O Si é proveniente da areia que compõe a argamassa.

O tubo de Au mostrou-se mais eficiente na detecção do elemento Cl, pois a análise com o tubo de Ag identifica o elemento, porém não mostra a concentração. Isso justifica o alto valor do erro apresentado pelo Cl, pois com os cálculos realizados foi possível adquirir valor menor para o erro associado em cada medida de concentração dos outros elementos (Tabela 21).

**Tabela 21 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de cimento Portland**

<b>Elemento</b>	<b>Fração de massa (mg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Erro</b>
Ca	64,20	0,52
Si	27,3	1,5
Fe	3,337	0,075
K	3,11	0,14
S	0,91	0,17
Sr	0,491	0,029
Ti	0,313	0,052
Cl	0,38	0,15
Mn	0,101	0,023
Cu	0,028	0,012
Ni	0,025	0,014

Embora os valores obtidos sejam da argamassa de cimento Portland e não apenas do cimento Portland, foi possível comparar os valores dados pelo equipamento de EDXRF utilizado neste trabalho com os valores estabelecidos pelo NIST (Tabela 16) e pelo fabricante (Tabela 17) que forneceu o cimento. Ambos apresentaram quantidades de elementos químicos similares.

Comparando ainda essas duas tabelas com a Tabela 21, referente a análise quantitativa da amostra de argamassa de cimento Portland, observa-se que a quantidade dos elementos fornecida pelo fabricante também está próxima à quantidade indicada pelo NIST (FERRARIS *et al.*, 2005), mesmo sendo a indicação apenas para o cimento. Entretanto, a pequena diferença de valores, pode ser devido a presença da areia na composição da argamassa, principalmente a quantidade de sílica (Si).

A amostra de argamassa de fosfogesso é constituída principalmente por Si, S e Ca (Tabela 22), sendo coerente com os trabalhos de Matos (2011) e El-Afifi (2009). A grande quantidade de Si detectada deve-se a presença da areia na argamassa.

No trabalho de El-Afifi (2009) o elemento P foi encontrado no fosfogesso em pequena concentração, provavelmente devido ao tipo de produção de fosfogesso.

**Tabela 22 - Análise quantitativa da amostra de argamassa de fosfogesso**

Elemento	Fração de massa (mg/cm <sup>2</sup> )	Erro
Si	49,8	2,3
S	24,66	0,96
Ca	22,10	0,42
K	2,83	0,22
Fe	0,756	0,039
Ti	0,401	0,057
Sr	0,294	0,025
Zn	0,066	0,012
Mn	0,050	0,025

Na análise do fosfogesso era esperado uma pequena quantidade ou nenhuma do elemento P, porque durante o processo de produção do fertilizante, e conseqüentemente, a produção do fosfogesso proveniente da rocha fosfática, o ideal é que o máximo possível do fósforo esteja na composição do fertilizante e apenas alguns resíduos presentes no fosfogesso. Por isso, não foi detectado o elemento P na amostra de argamassa de fosfogesso.

Portanto, a análise quantitativa foi importante para mensurar a quantidade de elementos encontrados nos três tipos de amostras estudadas.

#### 4.3.2 Medidas com espectrometria gama

Os resultados obtidos por meio da espectrometria gama forneceram a atividade específica, em Bq/kg, dos radionuclídeos encontrados nas amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso na forma em pó (Tabela 23).

O objetivo foi encontrar a atividade específica nas argamassas confeccionadas. Portanto, deve-se considerar os radionuclídeos presentes na areia. Dessa forma, utilizou-se a medida da areia analisada no trabalho da autora Del Claro (2013), por se tratar do mesmo tipo de areia utilizada na confecção dos corpos de prova.

**Tabela 23 - Atividade específica das amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso**

Amostra	Atividade Específica (Bq/kg)				<sup>40</sup> K
	Série <sup>238</sup> U		Série <sup>232</sup> Th		
	<sup>214</sup> Pb	<sup>214</sup> Bi ( <sup>226</sup> Ra)	<sup>212</sup> Pb ( <sup>224</sup> Ra)	<sup>228</sup> Ac	
Cimento Portland	56,86 ± 0,40	41,27±0,44	22,74 ± 0,22	9,16 ± 0,40	174,5 ± 2,4
Gesso natural	2,04 ± 0,09	1,91 ± 0,10	1,39 ± 0,07	0,40 ± 0,12	ND*
Fosfogesso	26,22 ± 0,32	18,34 ± 0,34	18,68 ± 0,23	12,20 ± 0,47	ND*
Areia	12,0 ± 0,2	11,4 ± 0,2	12,3 ± 0,2	11,9 ± 0,4	620,2 ± 4,5

\* ND – NÃO DETECTÁVEL

Os radionuclídeos de interesse são o <sup>226</sup>Ra, o <sup>232</sup>Th e o <sup>40</sup>K. O <sup>226</sup>Ra está em equilíbrio secular com o <sup>214</sup>Bi, por isso foi o valor adotado como atividade do <sup>226</sup>Ra. Os elementos <sup>212</sup>Pb e o <sup>228</sup>Ac são da série do <sup>232</sup>Th, dessa forma, foi realizado o cálculo da média dos dois valores de atividade específica considerando o erro associado, por meio das equações 4 e 6, respectivamente e obteve-se a atividade específica do <sup>232</sup>Th (Tabela 24).

**Tabela 24 - Atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  presentes nas amostras de cimento Portland, gesso natural e fosfogesso**

Amostra	Atividade Específica (Bq/kg)		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Cimento Portland	41,27 ± 0,44	19,60 ± 0,19	174,5 ± 2,4
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

\* ND – NÃO DETECTÁVEL

No capítulo 2, a Tabela 5 apresenta os radionuclídeos presentes no cimento proveniente de Israel. Nesse cimento há os seguintes radionuclídeos e suas respectivas atividades específicas: 13-107 Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ , 7-62 Bq/kg de  $^{232}\text{Th}$  e 48-564 Bq/kg de  $^{40}\text{K}$ . No trabalho de Malanca *et al.* (1993), os valores de atividade específica, para os mesmos elementos, estão dentro da faixa encontrada em Israel, sendo 61,7 Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ , 58,5 Bq/kg de  $^{232}\text{Th}$  e 564 Bq/kg de  $^{40}\text{K}$ .

Os resultados obtidos por Malanca *et al.* (1993) são mais elevados que os valores de atividade específica dos radionuclídeos que compõe o cimento analisado no presente trabalho, como mostra a Tabela 24.

Com o valor da atividade do  $^{232}\text{Th}$  estabelecido, foi calculado a concentração da mistura, ou seja, da argamassa para cada um dos três elementos de interesse, como apresentada na equação (9).

$$C = \frac{A}{m} \quad (9)$$

Onde C é a concentração da mistura, A é a atividade final dividida pela massa final (m). O resultado é dado em Bq/kg.

Foi considerado o erro obtido pelo espectrômetro e, também, o erro da balança ( $e = 0,0001$  kg) utilizada para mensurar a massa das amostras para a confecção dos corpos de prova, como apresentado na equação (10).

$$\sigma_y^2 = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial y_i} \right)^2 \sigma_j^2 \quad (10)$$



O resultado dos cálculos é mostrado na Tabela 25.

**Tabela 25 - Atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  presentes nas três amostras após a realização dos cálculos**

Amostra	Atividade Específica (Bq/kg)		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Argamassa de cimento Portland	$18,9 \pm 2,2$	$14,05 \pm 0,09$	$509 \pm 12$
Argamassa de gesso natural	$8,90 \pm 0,18$	$9,435 \pm 0,006$	* $465 \pm 11$
Argamassa de fosfogesso	$13,119 \pm 0,037$	$13,507 \pm 0,008$	* $465 \pm 11$

\*Os valores da atividade específica para o elemento  $^{40}\text{K}$  é proveniente da areia presente na argamassa.

A CNEN estabelece, por meio da resolução nº 147, o valor limite de 1000 Bq/kg para concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  para o fosfogesso utilizado nas indústrias cimenteiras. Comparado a esse valor, a atividade do  $^{226}\text{Ra}$  presente no fosfogesso empregado nesse trabalho, apresenta-se muito abaixo do limite estabelecido (CNEN, 2013).

O resultado obtido para os valores da atividade específica para cada elemento nas argamassas, são apresentados na Tabela 24. Esses valores possibilitaram calcular, por meio da equação (3), o rádio equivalente. Os resultados do  $R_{\text{eq}}$  estão disponibilizados na Tabela 26.

**Tabela 26 - Resultado do rádio equivalente ( $R_{\text{eq}}$ )**

Amostra	$R_{\text{eq}}$ (Bq/kg)
Argamassa de cimento Portland	$78,2 \pm 0,9$
Argamassa de gesso natural	$58,2 \pm 0,9$
Argamassa de fosfogesso	$68,2 \pm 0,9$

Os valores do  $R_{\text{eq}}$  dos três tipos de amostras encontram-se inferiores ao limite máximo permitido de 370 Bq/kg, como sugerem os autores AL-SULAIT *et al.* (2008).

O resultado do cálculo do  $R_{\text{eq}}$  do cimento no trabalho de Malanca *et al.* (1993) foi de 188,8 Bq/kg, sendo um valor maior que o  $R_{\text{eq}}$  da argamassa de cimento analisado neste trabalho (78,2 Bq/kg).

Um dos fosfogessos analisados no trabalho de Mazzilli *et al.* (2000), apresenta atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$  38 vezes mais alta que a atividade específica do  $^{226}\text{Ra}$  do fosfogesso estudado neste trabalho. Conseqüentemente o valor do  $R_{\text{eq}}$ , também, é elevado

(947 Bq/kg), ultrapassando o limite de 370 Bq/kg. Entretanto, de acordo com a CNEN (2013), esse fosfogesso poderia ser empregado na indústria cimenteira, pois a atividade específica do rádio é de 695 Bq/kg, estando abaixo de 1000 Bq/kg, como o recomendado.

Os valores do índice de concentração de atividade (I) que corresponde a cada amostra, também foram realizados a partir da equação 2, os erros associados também foram considerados. Para o cálculo dos erros foi empregada a equação (10). Os resultados encontram-se na Tabela 27.

**Tabela 27 - Resultado do índice de concentração de atividade (I)**

<b>Amostra</b>	<b>I</b>
Argamassa de cimento Portland	0,303±0,004
Argamassa de gesso natural	0,232±0,004
Argamassa de fosfogesso	0,227±0,004

O índice de todas as amostras encontrou-se inferior a 0,5, representando como dose efetiva anual menor ou igual a 0,3 mSv/a. Esse valor é considerado dentro dos limites estipulados pela CNEN (CNEN-NE 3.01, 2005).

#### 4.4 Medidas com AlphaGUARD

Os resultados adquiridos pelo equipamento AlphaGUARD foram visualizados no computador por meio do *software* DataEXPERT da SAPHYMO GmbH. As medidas das concentrações de radônio dos corpos de prova e do recipiente do *background* são apresentados na Tabela 28, bem como a concentração final de radônio que corresponde a subtração do valor do *background* da amostra associado ao erro que foi calculado pela propagação de erros. Considerou-se que foram realizadas, em duas horas, 120 medidas a cada minuto, o que foi incluído nos cálculos de propagação de erros.

**Tabela 28 - Concentração de  $^{222}\text{Rn}$  proveniente das amostras de argamassa de fosfogesso, gesso natural e cimento Portland**

<b>Amostras</b>	<b>Concentração média do <i>background</i> (<math>\text{Bq}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Concentração média de <math>^{222}\text{Rn}</math> das amostra (<math>\text{Bq}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Concentração final de <math>^{222}\text{Rn}</math> (<math>\text{Bq}/\text{m}^3</math>)</b>
Cimento Portland 1	41,0 ± 3,6	1037± 43	996± 43
Cimento Portland 2	15,2 ± 3,0	898± 40	883 ± 40
Cimento Portland 3	15,2 ± 3,0	681 ± 37	666 ± 37
Gesso natural 1	15,2 ± 3,0	114 ± 14	99 ± 14
Gesso natural 2	41,0 ± 3,6	87 ± 9	46 ± 10
Gesso natural 3	41,0 ± 3,6	90 ± 14	49 ± 15
Fosfogesso 1	41,0 ± 3,6	102 ± 10	61 ± 11
Fosfogesso 2	41,0 ± 3,6	83 ± 9	42 ± 10
Fosfogesso 3	15,2 ± 3,0	71 ± 7	56 ± 8

Realizou-se o cálculo da média ponderada para cada tipo de amostra com as equações (4) e (5). Além desse cálculo, a incerteza  $\sigma_y$  associada à média, dada pela equação (6) também foi utilizada, o que resultou nos valores demonstrados na Tabela 29.

**Tabela 29 - Valores da concentração média de  $^{222}\text{Rn}$  nos corpos de prova de argamassa de fosfogesso, gesso natural e cimento Portland**

<b>Amostra</b>	<b>Concentração média de <math>^{222}\text{Rn}</math> das amostras (<math>\text{Bq}/\text{m}^3</math>)</b>
Cimento Portland	854±23
Gesso natural	60,0±7,2
Fosfogesso	52,9±5,4

A partir dos valores encontrados foi feita a relação entre os níveis de concentração do gás radônio emitidos pelos corpos de prova analisados com um ambiente hipotético de dimensões de 3 m de altura, 4 m de largura e 3 m de profundidade, considerando que tal ambiente fosse revestido pelos materiais estudados. Primeiramente, foi realizado o cálculo do fator volume (V)/área (A) do frasco onde as amostras estavam armazenadas e o fator volume/área para o ambiente hipotético (Equação 11) como mostra a Tabela 30.

$$\text{Fator} = V/A \quad (11)$$

No caso do ambiente hipotético o volume do ambiente foi de 36 m<sup>3</sup> e a área de revestimento 54 m<sup>2</sup>.

**Tabela 30 - Valor do fator volume/área no recipiente e no ambiente hipotético**

<b>Ambiente</b>	<b>Fator volume/área (m)</b>
Recipiente	0,17
Ambiente hipotético	0,67

O valor do fator volume/área foi utilizado para fazer a regra de três com os valores da concentração média do  $^{222}\text{Rn}$  armazenado nos recipientes:

$$\begin{array}{rcl} \text{Concentração média de } ^{222}\text{Rn do recipiente (Bq/m}^3\text{)} & - & 0,17 \text{ m} \\ x \text{ (Bq/m}^3\text{)} & - & 0,67 \text{ m} \end{array}$$

Os valores de x, que indicam as concentrações médias de  $^{222}\text{Rn}$  nos ambientes hipotéticos são apresentados na Tabela 31.

**Tabela 31 - Resultado do cálculo da concentração média de  $^{222}\text{Rn}$  para simular os ambientes com revestimento de argamassa de cimento, de fosfogesso e de gesso natural**

<b>Revestimento do ambiente hipotético</b>	<b>Concentração média de <math>^{222}\text{Rn}</math> das amostras (Bq/m<sup>3</sup>)</b>
Argamassa de cimento Portland	3366±91
Argamassa de gesso natural	237±28
Argamassa de fosfogesso	208±21

Atualmente não há normas e regulamentos que indiquem a concentração de radônio permitida para a exposição de argamassa de cimento Portland, de fosfogesso e de gesso natural, isoladamente. Por isso, nesse trabalho utilizou-se como referência os valores estabelecidos por órgãos internacionais como a ICRP, WHO e USEPA e nacional como a CNEN. Todos esses órgãos estipulam valores para ambientes *indoor*.

De acordo com a WHO (2009), o limite deve ser de 100 Bq/m<sup>3</sup>, porém devido as diferenças do solo de cada região pode ser estabelecido como valor limite 300 Bq/m<sup>3</sup>, que equivale a 10 mSv. Esse valor representa para a CNEN a ação de proteção e remediação. Por outro lado, a EPA (2009) estabelece o valor limite aceitável de 148 Bq/m<sup>3</sup>. Portanto, as medidas realizadas para ambientes revestidos com argamassa de fosfogesso e gesso estão abaixo de 300 Bq/m<sup>3</sup> como recomendado pela ICRP (2014). Dessa forma, todos os resultados estão dentro do limite estabelecido por esse órgão.

A medida da concentração da argamassa de cimento Portland mostrou-se muito acima do valor recomendado pelo órgão citado (ICRP, 2014). Entretanto, deve-se considerar que as medidas foram realizadas em recipientes fechados, o que não acontece em uma residência devido a ventilação proveniente de portas e janelas.

Neste trabalho avaliou-se a concentração do radônio e também a atividade específica do rádio, como mencionado anteriormente. Esses valores permitem conhecer o coeficiente de emissão ( $f$ ) das amostras a partir da equação 1. A Tabela 32 mostra o resultado do cálculo do coeficiente de emissão.

**Tabela 32 - Coeficiente de emissão das amostras**

<b>Amostra</b>	<b><math>f</math>(%)</b>
Argamassa de cimento Portland	$2,1 \pm 0,06$
Argamassa de gesso natural	$0,3182 \pm 0,0004$
Argamassa de fosfogesso	$0,19 \pm 0,02$

Os valores do coeficiente de emissão indicam que  $(2,1 \pm 0,06)$  %,  $(0,3182 \pm 0,0004)$ % e  $(0,19 \pm 0,02)$  % de todo o radônio gerado nos corpos de prova de argamassa de cimento Portland, argamassa de gesso natural e argamassa de fosfogesso, respectivamente, exala do material contribuindo com a concentração em ambientes *indoor*. De acordo com Del Claro (2013), embora os percentuais de  $f$  sejam baixos e estejam em torno de até 2%, esses valores equivalem as concentrações obtidas pelo equipamento AlphaGUARD como apresentado na Tabela 29. Estes resultados são considerados normais, pois valores de  $f$  geralmente variam de 1 a 30%, dependendo do material de construção, ou seja, dos 100% de radônio que são emanados do material apenas de 1 a 30% são exalados para o ambiente (BIKIT *et al.*, 2011).

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões gerais

Os ensaios de resistência à compressão permitiram conhecer as características dos materiais, sendo que a argamassa de cimento apresenta resistência maior que as argamassas de gesso e de fosfogesso. Entretanto, a análise de porosidade não foi possível com o equipamento de raios X, pois não mostrou os poros existentes nas amostras. Para a análise de porosidade será necessário empregar outros métodos.

As análises qualitativa e quantitativa mostraram que as amostras de argamassa de fosfogesso e de gesso são compostas por Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Sr, V e elementos traços como o Mn e Zn, sendo que as maiores frações de massa são de Ca, S e Si. A amostra de argamassa de cimento Portland é constituída por Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Fe, Sr, V, P e elementos traços como o Ni, Cu e Mn. Os elementos predominantes nessa amostra são o Ca e a Si.

Em relação a caracterização dos radionuclídeos, o cimento Portland apresentou o  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , o gesso natural e o fosfogesso apresentaram esses mesmos elementos, exceto o  $^{40}\text{K}$ . Os cálculos realizados para estimar a concentração desses radionuclídeos nas argamassas resultou em atividade específica da argamassa de cimento Portland de  $18,9 \pm 2,2$  Bq/kg,  $14,05 \pm 0,09$  Bq/kg e  $509 \pm 12$  Bq/kg; para a argamassa de gesso natural  $8,90 \pm 0,18$  Bq/kg;  $9,435 \pm 0,006$  Bq/kg e  $465 \pm 11$  Bq/kg; e para a argamassa de fosfogesso  $13,119 \pm 0,037$  Bq/kg,  $13,507 \pm 0,008$  Bq/kg e  $465 \pm 11$  Bq/kg todos equivalentes ao  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$ , respectivamente. A CNEN (2013) estabelece o valor limite de 1000 Bq/kg para concentração de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  para o fosfogesso utilizado nas indústrias cimenteiras. Comparado a esse valor, a atividade do  $^{226}\text{Ra}$  presente no fosfogesso empregado nesse trabalho, apresenta-se muito abaixo do limite estabelecido.

Os níveis de concentração do gás radônio no ar, proveniente dos corpos de prova, de dimensões 5 cm x 10 cm, feitos de argamassas de cimento Portland, gesso e fosfogesso foram de  $854 \pm 23$  Bq/m<sup>3</sup>,  $60,0 \pm 7,2$  Bq/m<sup>3</sup> e  $52,9 \pm 5,4$  Bq/m<sup>3</sup>, respectivamente. Apenas a argamassa de cimento Portland apresentou níveis superiores a todos estabelecidos pelos órgãos nacional e internacionais.

Os valores obtidos foram extrapolados, por meio de cálculos, para um ambiente de convívio humano hipotético de 36 m<sup>3</sup>. Os resultados para os revestimentos com os materiais

foram de  $3366 \pm 91$  Bq/m<sup>3</sup> para a argamassa de cimento Portland,  $237 \pm 28$  Bq/m<sup>3</sup> para a argamassa de gesso natural e  $208 \pm 21$  Bq/m<sup>3</sup> para a argamassa de fosfogesso.

Embora os valores tenham sido elevados deve-se considerar que as medidas foram realizadas em recipientes hermeticamente fechados (aproximadamente 3 litros), o que não ocorre em uma residência devido a ventilação proveniente de portas e janelas. Neste contexto, acredita-se que a concentração nestes ambientes hipotéticos seria menor se houvessem aberturas para o escape do ar e também se houvesse uma camada de tinta para barrar a saída do radônio do interior do material. Além disso, a idade das amostras pode influenciar na exalação do radônio, pois com o passar do tempo a resistência das amostras pode mudar e, conseqüentemente, a quantidade de poros também.

A partir das concentrações dos radionuclídeos, foi possível avaliar o valor do rádio equivalente ( $R_{eq}$ ) para a argamassa de cimento Portland, de gesso natural e de fosfogesso que resultou em  $78,2 \pm 0,9$  Bq/kg,  $58,2 \pm 0,9$  Bq/kg e  $68,2 \pm 0,9$  Bq/kg, respectivamente. Os valores do  $R_{eq}$  dos três tipos de amostras encontram-se inferiores ao limite máximo permitido de 370 Bq/kg.

Com esse trabalho, conclui-se que é muito importante a análise de materiais de construção quanto à concentração do gás radônio, pois os indivíduos estão constantemente em contato com esses materiais. Além disso, é essencial registrar medidas dessas concentrações e, também, da atividade do <sup>226</sup>Ra presente no fosfogesso, mostrando que esse resíduo pode ser largamente empregado na indústria cimenteira, sem apresentar danos à saúde das pessoas e, dessa forma, contribuir com a redução das pilhas de fosfogesso próximos as indústrias de fertilizantes.

## 5.2 Sugestões de trabalhos futuros

- Fazer a análise das amostras argamassa de cimento Portland, de gesso natural e de fosfogesso com o método de EDXRF aplicando energias diferentes para fazer comparação com as medidas já realizadas.
- Elaborar padrões de calibração para o equipamento de EDXRF com a constituição similar das amostras, para melhorar a análise quantitativa.

- Utilizar detectores Cr 39 para mensurar a concentração de  $^{222}\text{Rn}$  nas mesmas amostras, com o objetivo de fazer uma análise comparativa.
- Analisar a porosidade das amostras com a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio e relacionar com a concentração de  $^{222}\text{Rn}$ .
- Verificar os níveis de concentração de radônio em argamassa com cal de revestimento.
- Averiguar o efeito da pintura de materiais de construção quanto a exalação do gás radônio.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

AL-JARALLAH, M. I.; FAZAL-UR-REHMAN; MUSAZAY, M.S.; AKSOY, A. Correlation between radon exhalation and radium content in granite samples used as construction material in Saudi Arabia. **Radiation Measurements**. V. 40, p. 625-629, 2005.

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

ARAÚJO, G.S. **Estudos dos Níveis de Emissão do  $^{222}\text{Rn}$  de Alguns Materiais de Construção Civil e Áreas Públicas**. 2003. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

ASLAM, M., GUL, R., ARA, T., HUSSAIN, M. Assessment of radiological hazards of naturally occurring radioactive materials in cement industry. **Radiation Protection Dosimetry**. v 151. n 3. p 483-488. 2012.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry – US Department of Health and Human Services. **Radon Toxicity**. 2012. Disponível em <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts145.pdf> Acesso em 10/07/2015.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. **Ministério da Ciência e Tecnologia**. Gipsita. Capítulo 21. Rio de Janeiro, 2005.

BERNHOF, L. F., GUSMÃO, A. D., TAVARES, Y. V. P. Influência da adição de resíduo de gesso no calor de hidratação da argamassa de revestimento interno. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. v. 11. n. 2. p. 189-199. Porto Alegre, 2011.

BIKIT, I., MRDA, D., GRUJIC, S., KOZMIDIS-LUBURIC, U. Granulation effects on the radon emanation rate. **Radiation Protection Dosimetry**. V 145, nº 2-3, 184-188, 2011.

BRIENZA, Sandra M. B.; FILHO, Virgílio F. N; MOREIRA, Silvana; VIVES, Ana E. S. **Emprego da fluorescência de raios X dispersiva para avaliação da poluição por metais pesados em amostras de água e sedimentos de lagos**. São Paulo, 2002.

BUENO, Maria I. M. J; NAGATA, Noemi; PERALTA-ZAMORA, Patricio G. **Métodos matemáticos para correção de interferências espectrais e efeitos interelementos na análise quantitativa por fluorescência de raios X**. Química Nova. V 24, nº 4, 531-539, 2001.

BRITISH CEMENT ASSOCIATION. **Concrete Practice**. 3 ed. 2002.

BRUKER ADVANCED X-RAY SOLUTIONS. **ARTAX™ user manual**. Berlin, 2006. 96 p.

CAMPOS, M. P. **Avaliação do impacto radiológico provocado por materiais de construção em moradores de casas populares**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 1994.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição Regulatória 3.01/007 – Níveis de Intervenção e de Ação para Exposição Crônica**. Rio de Janeiro, 2005.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Resolução nº 147**. Nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira. Rio de Janeiro, 2013.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Resolução nº 171**. Nível de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil. Rio de Janeiro, 2014.

CNEN NN - 3.01 - Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. 2014.

CIGNA, A.A. Radon in Caves. **International Journal of Speleology**, v .34, p.1 – 18, 2005.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 431**. p. 123. 2011.

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

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

COTA, S.D.S ; JACOMINO, V.M.F; TADDEI, M.H.T; NASCIMENTO, M.R. Modelagem numérica do impacto ambiental associado à aplicação de fosfogesso como cobertura de aterros sanitários. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. **Águas Subterrâneas**. v. 26.p. 27-42. 2012.

DEL CLARO, F. **Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR**. 2013. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. **Ministério de Minas e Energia**. 2014. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/>. Acesso em: maio de 2015.

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

EL-AFIFI, E. M., HILAL, M. A., ATTALLAH, M. F., EL-REEFY, S. A. Characterization of Phosphogypsum Wastes Associated with Phosphoric Acid and Fertilizers Production. **Journal of Environmental Radioactivity 100**. Elsevier. p. 407-412. 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Brasília, 2006. Disponível em: <http://www.agrolink.com.br/downloads/sistema-brasileiro-de-classificacao-dos-solos2006.pdf> Acesso em julho de 2015.

EPA – Environmental Protection Agency. **Radon in Drinking Water Health Risk Reduction and Cost Analysis**. Notice. Federal Register. v. 64. Washington, 1999.

EPA – Environmental Protection Agency. **Building Radon Out: A Step-by-Step Guide on How to Build Radon Resistant Homes.** Office of Air and Radiation, 2001.

ESTOKOVÁ, A.; PALASCAKOVÁ, L. Study of natural radioactivity of Slovak cements. **Chemical Engineering Transactions.** v. 32. p. 1675-1680.2013.

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

FERNANDES, H. M.; RIO, A. P. M.; FRANKLIN, M.R. **Impactos Radiológicos da Indústria do Fosfato.** 2004. Série Estudos & Documentos. CETEM/MCT 56. Disponível em: [http://www2.cetem.gov.br/publicacao/series\\_sed/sed-56.pdf](http://www2.cetem.gov.br/publicacao/series_sed/sed-56.pdf). Acesso em: agosto de 2015.

FERRARIS, C. F., GUTHRIE, W., AVILÉS, HAUPT, R., MACDONALD, B. S. **NIST Special Publication. Certification of SRM 114q: Part I.** NIST – National Institute of Standards and Technology. Disponível em: <http://www.nist.gov/srm/upload/SP260-161.pdf>. Acesso em: maio de 2015.

FIOR, L. **Análise da concentração de radônio provenientes 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.

GUSMÃO FILHO, J.A. **Solos: Da Formação Geológica ao Uso na Engenharia.** Editora Universitária UPFE: Pernambuco. 2 ed. v.1, p. 3-8, 2008.

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

HALL, E.J.; GIACCIA, A.J. **Radiobiology for the Radiologist.** Lippincott Williams & Wilkins: USA. 6 ed. p. 546. 2006.

IAEA – International Atomic Energy Agency. Safety Reports Series n° 33. **Radiation Protection Against Radon in Workplaces other than Mines**. Vienna, 2003.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. **ICRP 65 – Protection Against Radon-222 at Home and at Work**. Oxford: Pergamon Press, v. 23, n.2, 1993.

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

KOVLER, K., PEREVALOV, A., STEINER, V., METZGER, L. A. Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part I – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. **Journal of Environmental Radioactivity**. p 321-334. 2005.

LARA, E. G.; ROCHA, Z.; SANTOS, T. O.; MIGUEL, R. A.; NETO, A. D.; MENEZES, M. A. B. C.; OLIVEIRA, A. H. **Distribution of soil gas radon concentration in the metropolitan region of Belo Horizonte, Brazil and correlations with litologies and pedologies**. In: International Nuclear Atlantic Conference, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/056/43056356.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/056/43056356.pdf). Acesso em: abril de 2015.

MALANCA, A.; PESSINA, V.; DALLARA, G. Radionuclide content of building material and gamma ray dose rates in dwellings of Rio Grande do Norte, Brazil. **Radiation Protection Dosimetry**. v.48.n.2. p 199-203. 1993.

MARQUES, A.L.; GERALDO, L.P.; SANTOS, W. **Níveis de Radioatividade Natural Decorrente do Radônio no Complexo Rochoso da Serra de São Vicente, SP**. Radiologia Brasileira, 3 ed, v.39, p. 215 – 218, 2006.

MATOS, T. H. C. **Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília Departamento de Energia Civil e Ambiental. Brasília, 2011.

MAZZILI, B.; PALMIRO, V; SAUEIA, C. H. R; NISTI, M. B. Radiochemical characterization of brazilian phosphogypsum. **Elsevier: Journal Environmental Radioactivity**, n 49, p. 113-122. 2000.

MELO, V. P. **Avaliação da concentração de radônio em residências do município de Monte Alegre – PA**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Instituto de Biofísica UFRJ. Rio de Janeiro, 1999.

NAIN, M., CHAUHAN, R. P., CHAKARVARTI, S. K. Alpha Radioactivity in Indian Cement Samples. **Iranian Journal of Radiation Research**. v.3. p. 171-176. 2006.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. Pearson. 2.ed. 2010.

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

PEREIRA, R. R. **Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico do cimento Portland**. 2010. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2010.

POPOVIC, D.; TODOROVIC, D. Radon Indoor Concentration and Activity of Radionuclides in Building Materials in Serbia. **FACTA UNIVERSITATIS. Series: Physics, Chemistry and Technology**.v.4. n° 1. p. 11 – 20. 2006.

SANTOS, T. O. **Distribuição da concentração de radônio em residências e outras construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 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 fluorita e carvão do Estado de Santa Catarina: Critérios para avaliação dos riscos radiológicos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Geociências, Porto Alegre, 2008.

SAPHYMO GmbH. **The Reference in Professional Radon Measurement – AlphaGUARD**. 2009. Manual do usuário Saphymo. Disponível em: [http://www.saphymo.com/ftp/ecatalogue/154/ag\\_fb\\_gb\\_04\\_144dpi\\_ebook.pdf](http://www.saphymo.com/ftp/ecatalogue/154/ag_fb_gb_04_144dpi_ebook.pdf). Acesso em: outubro de 2014.

SILVA, Richard M. C. E. **Utilização da técnica de fluorescência de raios X com microsonda ( $\mu$  - XRF) aplicada a amostras de interesse arqueológico.** Tese de Doutorado. São Paulo. 2002.

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation.** 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.

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

WHO – World Health Organization. **Radon and Health.** 2004. Disponível em: <http://www.who.int/phe/radiation/en/2004Radon.pdf>. Acesso em: dezembro 2014.

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

## **APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES SOBRE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO RELACIONADOS AO TRABALHO**

NARLOCH, D. C. ; PASCHUK, S. A. ; CASALI, J. M. ; CORRÊA, J. N. ; CLARO, F. ; MACIOSKI, G. . Medidas da Concentração do Gás Radônio em Corpos de prova de Cimento Portland e Fosfogesso.. In: Latin American Symposium on Radon and II Symposium on Radon in Brazil, 2014, Poços de Caldas. Latin American Symposium on Radon and II Symposium on Radon in Brazil, 2014.

NARLOCH, D. C. ; PASCHUK, S. A. ; CORRÊA, J. N. ; CASALI, J. M. ; TORRES, C. A. M. P. ; LARA, A. L. . Caracterização elementar de amostras de fosfogesso, gesso e cimento por meio de EDXRF. In: XII Workshop de Física Molecular e Espectroscopia, 2014, Brasília. XII Workshop de Física Molecular e Espectroscopia, 2014.

NARLOCH, D. C. ; PASCHUK, S. A. ; CASALI, J. M. ; CORRÊA, J. N. ; CLARO, F. ; MACIOSKI, G. . Medidas da Concentração de Radônio-222 em Cimento, Fosfogesso e Gesso. X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica. Buenos Aires, Argentina. 2015.

NARLOCH, D. C. ; PASCHUK, S. A. ; CORRÊA, J. N. ; CASALI, J. M., DEL CLARO, F., KAPPKE, J., ROCHA, Z., SANTOS, T. O. Qualitative and quantitative analysis of Portland cement, gypsum and phosphogypsum samples by gamma spectrometry. XXXVIII Reunião de Trabalho sobre Física Nuclear no Brasil. 2015.



## ANEXO A - RELATÓRIO DE ENSAIO DA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

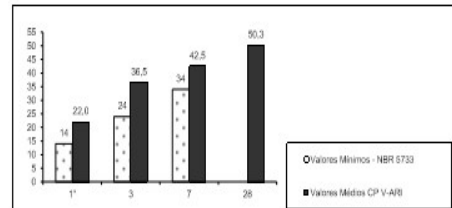
TIPO: CP V-ARI

### RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO

EMISSÃO: 31/01/2014

Data	Químicos										Físicos										
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.	Exp. Quente	Tempo de Pega		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325	Resistência à Compressão			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	h : min	h : min	%	cm <sup>2</sup> /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Média	4,37	19,05	2,77	60,36	4,93	2,75	2,93	1,47	0,73	0,70	0,47	02:34	03:11	29,1	4.268	0,30	2,16	22,0	36,5	42,5	50,3
Sd	0,16	0,15	0,10	0,34	0,17	0,23	0,11	0,20	0,05	0,04	0,11	00:11	00:10	0,6	94,53	0,11	0,51	1,0	1,5	1,2	0,6
Min	4,05	18,77	2,58	59,95	4,56	2,11	2,75	1,17	0,65	0,62	0,20	02:14	02:54	28,3	4.064	0,15	1,25	19,8	33,4	41,0	49,6
Max	4,52	19,30	2,95	61,05	5,15	2,92	3,09	1,86	0,82	0,73	0,64	02:48	03:27	30,0	4.406	0,45	2,84	23,3	39,0	44,4	51,5

Obs.: A Resistência à Compressão aos 28 dias do CP V-ARI é regida pela NBR 5733, a qual não estabelece valor mínimo.  
A massa específica média do CP V-ARI é 3,12 g/cm<sup>3</sup> (NER NM 23).  
As distas do relatório se referem ao dia de expedição do cimento.



**ANEXO B – ANÁLISE QUANTITATIVA, POR MEIO DA EDXRF, DAS AMOSTRAS  
COM TUBO DE Ag E Au**

Amostra de argamassa de gesso\_Tb Ag\_col 1 mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====

#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm.	Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On	99.96

Sample Table =====

Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	21.495	1.635	wt.%	26.096
1	S	Calc	36.996	0.948	wt.%	39.339
1	K	Calc	1.013	0.218	wt.%	0.883
1	Ca	Calc	37.102	0.639	wt.%	31.565
1	Ti	Calc	0.676	0.087	wt.%	0.481
1	Fe	Calc	2.385	0.093	wt.%	1.456
1	Sr	Calc	0.174	0.023	wt.%	0.068
1	Mn	Calc	0.108	0.035	wt.%	0.067
1	Zn	Calc	0.015	0.017	wt.%	0.008

Element Table =====

Elmt	Line	Cond.	Intensity	Error	Conc.	Calib.
	Code	Code	(c/s)	(c/s)		Coeff.
Si	Ka	1	9.09	0.691	21.495	0.0
S	Ka	1	75.97	1.947	36.996	0.0
K	Ka	1	2.81	0.604	1.013	0.0
Ca	Ka	1	130.69	2.252	37.102	0.0
Ti	Ka	1	2.88	0.372	0.676	0.0
Mn	Ka	1	0.93	0.297	0.108	0.0
Fe	Ka	1	24.45	0.957	2.385	0.0
Zn	Ka	1	0.27	0.300	0.015	0.0
Sr	Ka	1	4.11	0.540	0.174	0.0

Amostra de argamassa de gesso \_ Tb Au \_ col 1mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====

#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm.	Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On	99.82

Sample Table =====

Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	15.991	1.748	wt.%	0.000
1	S	Calc	28.453	1.238	wt.%	0.000
1	K	Calc	0.798	0.123	wt.%	0.000
1	Ca	Calc	49.517	0.629	wt.%	0.000
1	Ti	Calc	0.137	0.045	wt.%	0.000
1	Fe	Calc	4.372	0.098	wt.%	0.000
1	Sr	Calc	0.449	0.043	wt.%	0.000
1	Mn	Calc	0.089	0.028	wt.%	0.000
1	Zn	Calc	0.015	0.011	wt.%	0.000
1		Calc	0.000	0.000	wt.%	0.000

Element Table =====

Elmt	Line	Cond.	Intensity	Error	Conc.	Calib.
	Code	Code	(c/s)	(c/s)		Coeff.
Si	Ka	1	5.09	0.556	15.991	0.0
S	Ka	1	31.82	1.384	28.453	0.0
K	Ka	1	3.52	0.544	0.798	0.0
Ca	Ka	1	280.98	3.571	49.517	0.0
Ti	Ka	1	0.86	0.284	0.137	0.0
Mn	Ka	1	1.40	0.442	0.089	0.0
Fe	Ka	1	89.58	2.005	4.372	0.0
Zn	Ka	1	0.72	0.526	0.015	0.0
Sr	Ka	1	8.81	0.840	0.449	0.0

Amostra de argamassa de cimento Portland \_ Tb Ag \_ Col 1 mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====

#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm.	Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On	100.00

Sample Table =====

Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	36.072	2.163	wt.%	44.865
1	S	Calc	0.881	0.188	wt.%	0.960
1	Cl	Calc	0.000	0.000	wt.%	0.000
1	K	Calc	3.313	0.260	wt.%	2.960
1	Ca	Calc	56.588	0.770	wt.%	49.321
1	Ti	Calc	0.163	0.067	wt.%	0.119
1	Fe	Calc	2.504	0.108	wt.%	1.566
1	Sr	Calc	0.395	0.034	wt.%	0.157
1	Ni	Calc	0.023	0.026	wt.%	0.014
1	Cu	Calc	0.014	0.022	wt.%	0.008
1	Mn	Calc	0.047	0.035	wt.%	0.030

Element Table =====

Elmt	Line	Cond.	Intensity	Error	Conc.	Calib.
	Code	Code	(c/s)	(c/s)		Coeff.
Si	Ka	1	14.68	0.880	36.072	0.0
S	Ka	1	1.59	0.340	0.881	0.0
Cl	Ka	1	0.00	0.302	0.000	0.0
K	Ka	1	12.37	0.971	3.313	0.0
Ca	Ka	1	224.44	3.052	56.588	0.0
Ti	Ka	1	0.60	0.246	0.163	0.0
Mn	Ka	1	0.35	0.260	0.047	0.0
Fe	Ka	1	22.13	0.952	2.504	0.0
Ni	Ka	1	0.26	0.303	0.023	0.0
Cu	Ka	1	0.19	0.297	0.014	0.0
Sr	Ka	1	7.90	0.684	0.395	0.0

---

Amostra de argamassa de cimento Portland \_ Tb Au \_ col 1mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====

#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm.	Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On	100.00

Sample Table =====

Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	19.289	2.067	wt.%	0.000
1	S	Calc	1.019	0.356	wt.%	0.000
1	Cl	Calc	0.376	0.146	wt.%	0.000
1	K	Calc	3.019	0.168	wt.%	0.000
1	Ca	Calc	70.664	0.709	wt.%	0.000
1	Ti	Calc	0.533	0.081	wt.%	0.000
1	Fe	Calc	4.124	0.105	wt.%	0.000
1	Sr	Calc	0.771	0.058	wt.%	0.000
1	Ni	Calc	0.026	0.017	wt.%	0.000
1	Cu	Calc	0.034	0.014	wt.%	0.000
1	Mn	Calc	0.144	0.031	wt.%	0.000
1		Calc	0.000	0.000	wt.%	0.000

Element Table =====

Elmt	Line	Cond.	Intensity	Error	Conc.	Calib.
	Code	Code	(c/s)	(c/s)		Coeff.
Si	Ka	1	5.01	0.537	19.289	0.0
S	Ka	1	1.01	0.353	1.019	0.0
Cl	Ka	1	0.79	0.307	0.376	0.0
K	Ka	1	17.76	0.991	3.019	0.0
Ca	Ka	1	430.85	4.322	70.664	0.0
Ti	Ka	1	2.62	0.397	0.533	0.0
Mn	Ka	1	1.78	0.387	0.144	0.0
Fe	Ka	1	66.28	1.687	4.124	0.0
Ni	Ka	1	0.65	0.416	0.026	0.0
Cu	Ka	1	1.06	0.432	0.034	0.0
Sr	Ka	1	11.73	0.883	0.771	0.0

Amostra de argamassa de fosfogesso \_Tb Ag\_col 1mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====

#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm.	Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On	100.00

Sample Table =====

Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	51.970	2.885	wt.%	57.727
1	S	Calc	26.282	1.162	wt.%	25.569
1	K	Calc	2.372	0.373	wt.%	1.893
1	Ca	Calc	18.299	0.562	wt.%	14.243
1	Ti	Calc	0.211	0.069	wt.%	0.137
1	Fe	Calc	0.495	0.053	wt.%	0.277
1	Sr	Calc	0.231	0.028	wt.%	0.082
1	Mn	Calc	0.057	0.041	wt.%	0.032
1	Zn	Calc	0.084	0.022	wt.%	0.040

Element Table =====

Elmt	Line	Cond.	Intensity	Error	Conc.	Calib.
	Code	Code	(c/s)	(c/s)		Coeff.
Si	Ka	1	12.87	0.714	51.970	0.0
S	Ka	1	21.06	0.931	26.282	0.0
K	Ka	1	3.26	0.514	2.372	0.0
Ca	Ka	1	33.68	1.034	18.299	0.0
Ti	Ka	1	0.59	0.192	0.211	0.0
Mn	Ka	1	0.32	0.231	0.057	0.0
Fe	Ka	1	3.39	0.362	0.495	0.0
Zn	Ka	1	1.04	0.278	0.084	0.0
Sr	Ka	1	3.88	0.468	0.231	0.0

Amostra de argamassa de fosfogesso \_Tb Au \_col 1mm

CrossRoads Scientific XRF Report

Layer Table =====						
#	Thick	Type	Error	Units	Density	Norm. Total
1	0.00	Bulk	0.00	mg/cm2	0.00	On 99.82

Sample Table =====						
Layer	Component	Type	Concn.	Error	Units	Mole%
1	Si	Calc	46.171	3.671	wt.%	0.000
1	S	Calc	21.227	1.692	wt.%	0.000
1	K	Calc	3.075	0.270	wt.%	0.000
1	Ca	Calc	26.832	0.627	wt.%	0.000
1	Ti	Calc	0.809	0.101	wt.%	0.000
1	Fe	Calc	1.056	0.059	wt.%	0.000
1	Sr	Calc	0.547	0.056	wt.%	0.000
1	Mn	Calc	0.046	0.031	wt.%	0.000
1	Zn	Calc	0.058	0.015	wt.%	0.000
1		Calc	0.000	0.000	wt.%	0.000

Element Table =====						
Elmt	Line Code	Cond. Code	Intensity (c/s)	Error (c/s)	Conc.	Calib. Coeff.
Si	Ka	1	9.97	0.793	46.171	0.0
S	Ka	1	10.49	0.836	21.227	0.0
K	Ka	1	7.58	0.666	3.075	0.0
Ca	Ka	1	90.18	2.108	26.832	0.0
Ti	Ka	1	3.98	0.497	0.809	0.0
Mn	Ka	1	0.57	0.386	0.046	0.0
Fe	Ka	1	17.27	0.961	1.056	0.0
Zn	Ka	1	2.40	0.635	0.058	0.0
Sr	Ka	1	9.23	0.944	0.547	0.0





# UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

## Laboratório de Materiais

### Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL30000N** Célula: **Trd 29** Extensômetro: - Data: **07/07/2014** Hora: **17:34:34** Trabalho n° **0969**  
 Programa: **Tesc versão 3.05** Método de Ensaio: **DL30\_Gus\_compressao\_cilindrico\_argamassa**  
 Ident. Amostra: > ALUNO: **Danielle** MATERIAL: **Argamassa de Fosfogesso com muito aditivo** ENSAIO: **Compressão Axial**

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Força Máxima (kgf)	Tensão (MPa)
CP 1	3625,03	369,65	1,85
CP 2	2781,53	283,64	1,42
CP 3	2962,28	302,07	1,51
Média	3123	318,5	1,591
Mediana	2962	302,1	1,509
Desv. Padrão	444,1	45,29	0,2262
Coef. Var. (%)	14,22	14,22	14,22
Mínimo	2782	283,6	1,417
Máximo	3625	369,7	1,846

