

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

FERNANDA HELENA OMBRELLINO  
KAREN PAZEMECKAS DE FARIA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO NA  
CONTRUÇÃO CIVIL:  
PASTA PARA REVESTIMENTO E ARGAMASSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2014

FERNANDA HELENA OMBRELLINO  
KAREN PAZEMECKAS DE FARIA

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO NA  
CONTRUÇÃO CIVIL:  
PASTA PARA REVESTIMENTO E ARGAMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

Co-orientadora: Profª Dra. Janine Nicolosi Corrêa

CURITIBA

2014

---

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

***ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO FOSFOGESSO NA  
CONSTRUÇÃO CIVIL: PASTA PARA REVESTIMENTO E  
ARGAMASSA***

Por

KAREN PAZEMECKAS DE FARIA  
FERNANDA HELENA OMBRELLINO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado em 25 de agosto de 2013, pela seguinte banca de avaliação:

---

Prof. Orientador – Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

Profa. Co-orientadora – Janine Nicolosi Corrêa, Dra.  
UTFPR

---

Prof. Marcelo Queiroz Varisco, Dr.  
UTFPR

Aos **pais**, por acreditarem no nosso potencial  
Às **irmãs**, pelo amor, pela amizade e pela paciência  
Ao **Diego** e ao **Raul**, por todo amor e apoio  
A **todos** que, de alguma maneira, contribuíram para a realização desse trabalho

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre guiou nosso caminho e nos deu equilíbrio e força para superarmos todos os desafios.

Às nossas famílias, agradecemos por todo amor, carinho e apoio nas horas difíceis.

Aos nossos verdadeiros amigos, por estarem presentes em todos os momentos, nos ajudando sempre que possível.

Nossos agradecimentos especiais:

À **Profª Janine Nicolosi Corrêa** e ao **Prof. Wellington Mazer**, por todo o conhecimento compartilhado e empenho dedicado durante a orientação deste trabalho.

À **Profª Juliana Machado Casali**, por acreditar no nosso potencial e nos confiar a realização deste estudo.

À **Karla Kamile Ombrellino** e ao **Raul de Macedo Queixada**, por toda consultoria prestada e por terem tornado nosso TCC o melhor possível.

Ao **Alexandre Erbs**, pela ajuda e suporte técnico com os materiais.

À **Danielle Narloch**, pela parceria e auxílio prestado durante a realização dos ensaios.

## RESUMO

FARIA, Karen Pazemeckas de; OMBRELLINO, Fernanda Helena. Estudo da utilização do fosfogesso na construção civil: pasta para revestimento e argamassa. 2014. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Produção Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

As consequências da falta de opções para a destinação do resíduo possivelmente radioativo da indústria de fertilizantes, o fosfogesso, trazem grandes problemas tanto para a indústria, que deve fornecer um local para armazenamento do fosfogesso, como para as pessoas que estão em contato com o ambiente contaminado. Assim, torna-se necessária a busca por novas alternativas para solucionar o problema de maneira viável nos âmbitos econômicos e ambientais. A utilização deste resíduo em substituição parcial ou total do gesso natural visa solucionar um problema existente em outra indústria beneficiando a construção civil.

O presente trabalho objetiva desenvolver materiais para a construção civil, pasta para revestimento e argamassa, com a substituição total ou parcial do gesso por fosfogesso. Para que tal objetivo fosse alcançado, foram realizados ensaios mecânicos e radiológicos tanto nas composições contendo o fosfogesso quanto com o gesso natural puro.

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que a utilização do resíduo fosfogesso na construção civil, como material de construção, em substituição parcial do gesso natural, é possível em aplicações que não demandam resistência da peça. A concentração de radônio advinda da composição substituindo 5% do gesso por fosfogesso foi inferior aos limites internacionais, possibilitando a aplicação desta composição sem comprometer a saúde da população.

**Palavras-chave:** Fosfogesso. Gesso. Radônio. Materiais de construção. Radiação. Resíduo.

## ABSTRACT

FARIA, Karen Pazemeckas de; OMBRELLINO, Fernanda Helena. Study of use of phosphogypsum in the construction industry: plaster and mortar. 2014. 64f. Course completion work – Civil Engineering, Civil Construction Department, Federal Technological University of Paraná – Paraná, Curitiba, 2014.

The consequences of the lack of options for the final disposal of the possibly radioactive waste from the fertilizer industry, the phosphogypsum, bring problems for the companies, who must provide adequate storage for the phosphogypsum, as well as for the people who are exposed to the contaminated environment. Thus, making it essential to find new economically and environmentally viable solutions. The use of this waste as a total or partial replacement for natural gypsum aims to solve the existing problem, benefiting the construction industry.

The present work aims to develop materials for the construction industry, plaster and mortar, with total or partial substitution of gypsum for phosphogypsum. In order to reach the aim of this study, mechanical tests as well as radiological tests were performed on mixtures containing phosphogypsum and on pure natural gypsum.

From the obtained results, it was possible to note that the use of the waste phosphogypsum in the construction industry, as a construction material, in partial substitution of natural gypsum, is possible for applications that do not demand strength from the part. The concentration of radon from the mixture substituting 5% of gypsum for phosphogypsum was below the international limits, making the use of this mixture possible without compromising the health of the population.

**Keywords:** Phosphogypsum. Gypsum. Radon. Construction materials. Radiation. Waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Núcleos estáveis e núcleos com excesso de energia .....	15
Figura 2 – Etapas da produção de ácido fosfórico .....	19
Figura 3 - Planta de produção de ácido fosfórico da Vale Fertilizantes.....	20
Figura 4 – Lagoas de sedimentação .....	21
Figura 5 - Séries radioativas Naturais .....	24
Figura 6 - Mecanismos de transporte do radônio em materiais de construção para ambiente <i>indoor</i> .....	26
Figura 7 - Corpo de prova de pasta de fosfogesso .....	32
Figura 8 - Corpo de prova de argamassa de fosfogesso e areia.....	33
Figura 9 - Placas de argamassa de fosfogesso e areia .....	33
Figura 10 - Ensaio de consistência normal .....	37
Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão axial .....	38
Figura 12 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	38
Figura 13 - Ensaio de absorção de água .....	39
Figura 14 - Detector passivo de radônio .....	40
Figura 15 - Célula-teste revestida com pasta de fosfogesso e gesso .....	40
Figura 16 - Célula-teste revestida com pasta de gesso .....	40
Figura 17 - Medidor ativo no ambiente-teste.....	43
Figura 18 - Corpos de prova rompidos por compressão .....	45
Figura 19 - Corpo de prova rompido por tração .....	46
Figura 20 - Corpos de prova após a realização do ensaio de absorção .....	48
Figura 21 – Comparativo dos resultados de concentração de radônio – CR-39 .....	49
Figura 22 – Comparativo dos resultados de concentração de radônio – CR-39 .....	51
Figura 23 - Corpo de prova de pasta de fosfogesso com fissuras .....	52
Figura 24 - Corpo de prova de argamassa de fosfogesso sendo desmoldado .....	53
Figura 25 - Placa pré-moldada fissurada .....	53
Figura 26 - Corrosão dos moldes.....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química típica da rocha fosfática de Minas Gerais .....	18
Tabela 2 – Composição química do fosfogesso.....	23
Tabela 3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial .....	44
Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	46
Tabela 5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão .....	47
Tabela 6 – Resultados do detector CR-39 .....	48
Tabela 7 – Relação entre o intervalo da variável e a probabilidade .....	49
Tabela 8 – Resultados do detector AlphaGUARD.....	50

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ICRP 60	International Commission on Radiological Protection
INB	Indústrias Nucleares do Brasil
NBR	Norma Brasileira Registrada
NORM	<i>Naturally Occurring Radioactive Materials</i>
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
SI	Sistema Internacional
TENORM	<i>Techologically Enhanced Occurring Radioactive Materials</i>
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	RADIOATIVIDADE.....	15
2.1.1	Radiação natural.....	16
2.1.2	Concentração dos radionuclídeos naturais.....	17
2.2	O FOSFOGESSO.....	17
2.2.1	Produção de Fertilizantes Fosfatados.....	18
2.2.2	Armazenamento do Fosfogesso.....	21
2.2.3	Características do Fosfogesso.....	22
2.3	FOSFOGESSO E A RADIAÇÃO.....	23
2.3.1	Radônio - 222.....	25
2.3.1.1	Radônio em materiais de construção.....	25
2.3.1.2	Sistemas de detecção de Radônio.....	27
2.4	APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO.....	27
2.4.1	Aplicações na Agricultura.....	27
2.4.2	Aplicações na Produção de Cimento.....	28
2.4.3	Aplicações na Construção Civil.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	MATERIAIS.....	30
3.1.1	Fosfogesso.....	30
3.1.2	Gesso.....	30
3.1.3	Areia.....	30
3.1.4	Água.....	31
3.2	MÉTODOS.....	31
3.2.1	Composições Previstas.....	31
3.2.1.1	Fosfogesso e água.....	31
3.2.1.2	Fosfogesso, areia e água.....	32
3.2.2	Composições Alternativas.....	34
3.2.2.1	Gesso e água.....	34

3.2.2.2	Fosfogesso, gesso e água .....	35
3.2.3	Ensaio Realizados .....	35
3.2.4	Consistência Normal da Pasta .....	36
3.2.5	Resistência à Compressão Axial .....	37
3.2.6	Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	38
3.2.7	Absorção de Água .....	39
3.2.8	Medidas de Radônio com Detector Passivo .....	39
3.2.9	Medidas de Radônio com Detector Ativo .....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	ENSAIO DE CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA.....	44
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	44
4.3	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	46
4.4	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA .....	47
4.5	MEDIÇÃO DE RADÔNIO COM DETECTOR PASSIVO .....	48
4.6	MEDIÇÃO DE RADÔNIO COM DETECTOR ATIVO.....	50
4.7	OBSERVAÇÕES GERAIS .....	51
5	CONCLUSÕES .....	55
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	55
5.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	56
	REFERÊNCIAS.....	58

## 1 INTRODUÇÃO

Os temas sustentabilidade e inovação têm se tornado cada vez mais recorrentes no discurso e nas estratégias das empresas. Além de influenciarem diretamente nos resultados, podendo auxiliar na redução de custos e otimização de processos, também têm impacto em questões ambientais e sociais. Considerando o contexto das indústrias, uma das áreas mais desafiadoras e que mais demanda soluções sustentáveis e inovadoras é a destinação e aproveitamento de resíduos da produção industrial.

Um exemplo disso é o processo de fabricação do ácido fosfórico, que é utilizado na produção de fertilizantes fosfatados e tem como seu principal resíduo o fosfogesso. O fosfogesso também conhecido como gesso químico ou gesso industrial, é um material de composição similar ao do gesso comum, porém, é formado principalmente por sulfato de cálcio hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que contém impurezas e alguns radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório, metais pesados que são naturalmente encontrados em rochas (MAZZILI e SAUEIA, 1997). Dentre os radionuclídeos presentes no fosfogesso, destaca-se o rádio ( $^{226}\text{Ra}$ ), devido ao seu descendente direto, o radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), um gás inerte que, quando inalado, causa problemas ao sistema respiratório (RABI e SILVA, 2005).

Em 2010, a produção mundial de rocha fosfática foi de 176 milhões de toneladas, sendo que no Brasil a produção corresponde a 3,5% do total mundial (DNPM, 2011). Em consequência disso, a produção brasileira de fosfogesso chega a 5,5 milhões de toneladas por ano, produção essa que é armazenada ao ar livre (CANUT, 2006).

A falta de um destino apropriado para este material tem se tornado um problema cada vez maior, devido à crescente produção. Além de demandar grandes espaços para o seu armazenamento, o fosfogesso contamina o ambiente ao seu redor por diferentes vias, tais como a contaminação atmosférica por fluoreto e outros elementos tóxicos, poluição das águas subterrâneas por acidez e radionuclídeos, emissão de radônio, inalação de poeira radioativa e exposição direta à radiação gama (PEREIRA, 2010).

Devido às semelhanças entre as propriedades do fosfogesso e do gesso comum, um possível destino para os resíduos da indústria de fertilizantes seria a aplicação deste material na construção civil (CANUT, 2006). Como este setor é um

dos principais consumidores de recursos naturais, a utilização de um resíduo implicaria na redução de custos e na redução dos danos ambientais causados pela obtenção de matéria-prima e pela estocagem inadequada do fosfogesso. Atualmente o fosfogesso é utilizado como adição ao clínquer do cimento Portland, em teor máximo de 5%, segundo especificação brasileira (MAZZILI e SAUEIA, 1997).

Para possibilitar a aplicação deste material na construção civil, suas características físicas e químicas devem ser estudadas, verificando-se se suas propriedades atendem às necessidades dessa indústria e, também, se a emissão de radiação ionizante, especificamente o radônio, está abaixo dos limites propostos por órgãos internacionais.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver materiais para a construção civil (pasta para revestimento e placas pré-moldadas de argamassa), com a utilização do fosfogesso como matéria-prima.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Sugerir uma dosagem para produzir os materiais de construção (pasta para revestimento e placas pré-moldadas de argamassa), possibilitando uma consistência adequada para a moldagem dos materiais especificados;
- Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas, no estado endurecido, dos materiais de construção produzidos;
- Determinar a concentração de radônio advindo dos materiais produzidos com fosfogesso em ambientes células-teste;
- Comparar as concentrações de radônio obtidas com os limites estabelecidos pelos órgãos internacionais;

- Comparar os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais produzidos com as recomendações de normas brasileiras e internacionais.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que, segundo Costa (2011), as consequências da falta de opções para a destinação do fosfogesso são grandes problemas tanto para a indústria, que deve fornecer um local para armazenamento do fosfogesso, como para as pessoas que estão em contato com o ambiente contaminado, torna-se necessário buscar novas alternativas para solucionar o problema de maneira viável nos âmbitos econômicos e ambientais.

Observando que há uma tendência mundial em buscar o aproveitamento de resíduos e que o fosfogesso já é usado na produção do cimento Portland, como adição ao clínquer (AQUINO, 2005), cogita-se a possibilidade da utilização do fosfogesso em maior escala no setor da construção civil, pois apenas uma pequena parcela do resíduo gerado pela indústria de fertilizantes é consumida para este fim. O resíduo não utilizado é acumulado ao ar livre, apresentando riscos ambientais (CANUT, 2006).

Durante o processo de produção do ácido fosfórico, gerador do resíduo fosfogesso, os radionuclídeos encontrados na rocha fosfática são incorporados ao ácido fosfórico e ao fosfogesso. Desta maneira os subprodutos do processo tornam-se emissores de radiação da série de decaimento do urânio e do tório (JACOMINO, 2003). Esta emissão de radiação pode ser quantificada pela medição da concentração de gás radônio no ambiente.

A partir de informações de órgãos internacionais, há um limite pré-estabelecido para a concentração de gás radônio em ambientes de convívio e, esses níveis, devem ser obedecidos também no Brasil. Com isso, o presente trabalho visa, também, a partir dos dados obtidos com os experimentos, verificar a possibilidade de, dentro da área da construção civil, encontrar alternativa para solucionar um problema ambiental gerado em outro setor, beneficiando ambas as partes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são abordados temas necessários para a compreensão do problema existente e dos objetivos propostos neste trabalho.

São abordados temas referentes ao fosfogesso, como a sua geração, composição química, características físico-químicas, estocagem e possíveis aplicações. Para compreensão dos problemas relacionados a este material, é necessário também o entendimento de conceitos de radioatividade dos materiais.

A partir do entendimento e da avaliação dos temas tratados, torna-se possível evidenciar o potencial de aplicabilidade do fosfogesso na construção civil, em substituição ao gesso natural.

### 2.1 RADIOATIVIDADE

Quando um núcleo é muito enérgico por ter excesso de partículas ou cargas ele tende a se estabilizar. Para isso acontecer, ocorre a emissão de algumas partículas. Esse fenômeno é conhecido como radioatividade. Na Figura 1 são mostrados exemplos de núcleos estáveis e núcleos com excesso de energia.

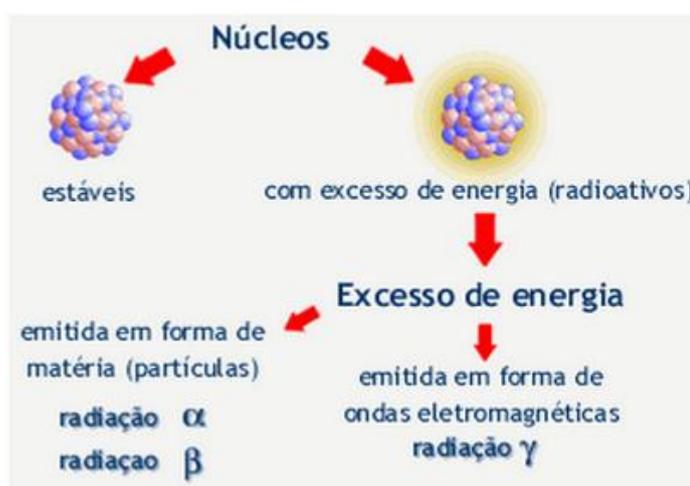


Figura 1 – Núcleos estáveis e núcleos com excesso de energia

Fonte: CNEN (2006)

Segundo as Indústrias Nucleares do Brasil (2014), células ou pequenos organismos podem ser destruídos pela absorção das energias das radiações o que

pode ser danoso ao organismo dependendo do tempo e intensidade da exposição à radiação.

Diversas unidades de medida são utilizadas para descrever níveis e doses radioativas. O Sistema Internacional (SI) utiliza a unidade Becquerel (Bq) para a radioatividade, que mede o número de desintegrações por unidade de segundo. Além dessa unidade de medida, segundo a UNSCEAR (2008), o millisievert (mSv) quantifica a exposição dos indivíduos às fontes de radiação, grandeza conhecida como dose efetiva.

A radiação pode ser dividida em dois tipos: a artificial e a natural; ambas são fenômenos de mesma natureza, porém a artificial é produzida em laboratórios ou nos reatores nucleares e a natural está presente em todos os elementos, pois a terra, os seres vivos e tudo que os cercam contêm átomos naturalmente radioativos (INB, 2014).

Considerando o tema do trabalho apresentado, será dado ênfase na radiação natural, assunto abordado no próximo tópico.

### 2.1.1 Radiação natural

Segundo Costa (2011), considerando o fato de que há uma probabilidade de emissão nuclear para qualquer elemento, pode-se dizer que existe radiação natural presente no universo desde sua origem e que, com isso, o homem é inevitavelmente exposto às radiações.

Segundo o INB (2014), todas as estrelas emitem radiações, sendo que o sol é a principal fonte de radiação natural no planeta. Além do sol, pode-se citar também o solo, a água e o ar como outras fontes de radiação natural.

Existem materiais radioativos que estão presentes na crosta terrestre desde sua formação, que são denominados radionuclídeos primordiais. Estes radionuclídeos podem ocorrer isoladamente, como o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), ou pertencerem às cadeias de decaimento radioativo como as das séries do urânio ( $^{238}\text{U}$ ), tório ( $^{232}\text{Th}$ ) e do actínio que é originada do urânio ( $^{235}\text{U}$ ) (EISENBUD e GESSEL, 1997).

### 2.1.2 Concentração dos radionuclídeos naturais

Uma das consequências do desenvolvimento e dos avanços tecnológicos é o aumento da concentração de radionuclídeos naturais em determinados materiais. Essa situação tem chamado a atenção da comunidade científica e tem-se realizado estudos mais detalhados sobre a quantificação de radionuclídeos naturais em determinados materiais (VILLAVERDE, 2008).

Segundo Canut (2006), existem dois tipos de classificação para materiais que contém radionuclídeos naturais: os de ocorrência natural, denominados NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) e os tecnologicamente aumentados conhecidos como TENORM (*Techologically Enhanced Occurring Radioactive Materials*). Essa classificação é feita dependendo se houve ou não um processamento industrial que acarretasse no aumento da concentração de radionuclídeos no material e, conseqüentemente, aumento do nível de radioatividade (VILLAVERDE, 2008).

Dentre os materiais classificados como TENORM, pode-se citar o fosfogesso, um subproduto da indústria de fertilizantes fosfatados, sobre o qual o houve um aumento da concentração de radionuclídeos causado pela intervenção humana (VILLAVERDE, 2008).

## 2.2 O FOSFOGESSO

O fosfogesso é também conhecido na literatura técnica como subproduto de gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético (CANUT, 2006). É chamado de fosfogesso por conter resíduos de fósforo em sua composição, entre 0,7% a 0,9% (NUERNBERG *et al.*, 2005).

Este composto químico é um resíduo da indústria de ácido fosfórico sendo que o ácido fosfórico é a principal matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados (VILLAVERDE, 2008). A necessidade do uso de fertilizantes nas lavouras em conjunto com o crescimento da demanda alimentícia acarreta em números cada vez maiores de geração de fosfogesso (VILLAVERDE, 2008).

### 2.2.1 Produção de Fertilizantes Fosfatados

Os fertilizantes com formulações comerciais denominados de NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) são obtidos de minerais fosfóricos provenientes de rochas fosfáticas (SILVA, 2001). Portanto, a produção de fertilizantes fosfatados depende da exploração de jazidas de rochas fosfáticas, única fonte viável de fósforo (CANUT, 2006).

As rochas fosfáticas são, em sua maioria, de origem ígnea e sedimentar, a primeira representando de 15 a 20% do total e a segunda representando os 80 a 85% restantes (DNPM, 2009). No Brasil, a maior parte das reservas de rocha fosfática são de origem ígnea e estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Goiás e São Paulo enquanto no nordeste são encontradas as reservas de rocha fosfática de origem sedimentar (DNPM, 2009). Os principais minérios de fosfato no Brasil são a apatita e a fosforita, encontradas principalmente no sudeste e no nordeste, respectivamente. A apatita contém altos teores de flúor, ferro e traços de metais pesados, como o urânio e tório (DNPM, 1976). Já a fosforita, principal mineral das rochas sedimentares brasileiras, contém carbonatos de cálcio e magnésio, óxidos de ferro e alumínio, e traços de urânio e tório (ROSA, 1997).

A extração da rocha fosfática no Brasil está nas mãos de poucas empresas e no ano de 2008 alcançou 6727 mil toneladas, com a maior contribuição sendo do estado de Minas Gerais (50,8%) (DNPM, 2009).

A composição química típica da rocha fosfática em Minas Gerais é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química típica da rocha fosfática de Minas Gerais

<b>Elementos</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	36,03
CaO	49,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25
MgO	0,38
TiO <sub>2</sub>	1,75
SiO <sub>2</sub>	2,15

Fonte: FOSFÉRTIL, 2005

Para a produção de ácido fosfórico, a rocha é primeiramente britada e então moída para ser levada a um separador magnético onde é possível separar magnetita do minério fosfático (VILLAVERDE, 2008). Depois, pelo processo de flotação, é obtido um concentrado de apatita na fase aquosa, que passa por um espessador e um secador para enfim obter o concentrado de rocha fosfática, com teor de 35% de ácido fosfórico (PAES, 2001). Espessadores são equipamentos empregados na indústria de minérios com a função de adensar polpas (PINTO, 2007). São tipicamente constituídos de um tanque cilíndrico vertical, com fundo ligeiramente cônico, com saídas na parte inferior para o sólido precipitado e saídas na parte superior para o líquido clarificado (PINTO, 2007). Na Figura 2 é apresentado um esquema com as principais etapas na produção de ácido fosfórico.

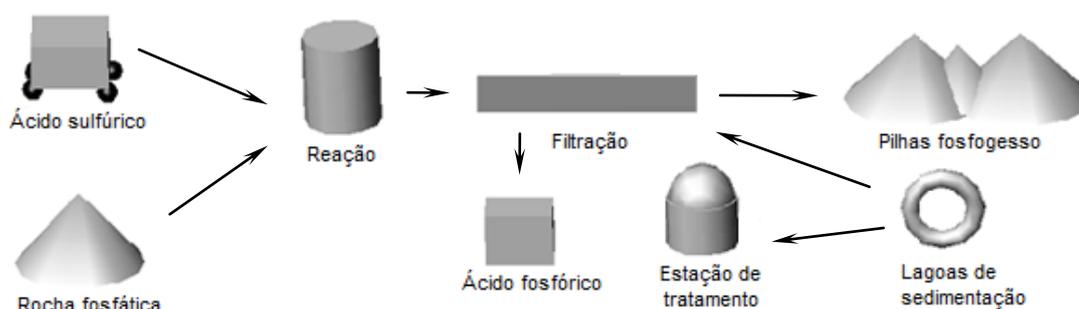


Figura 2 – Etapas da produção de ácido fosfórico

Fonte: CANUT (2006)

Este concentrado, muito insolúvel, necessita de um ataque químico muito drástico para a obtenção do ácido fosfórico. Esse processo pode se dar por duas maneiras distintas: o processo por via úmida e o processo por via seca (VILLAVERDE, 2008). O processo por via úmida é utilizado em mais de 90% dos casos, geralmente utilizado na obtenção de ácido fosfórico para a indústria de fertilizantes (VILLAVERDE, 2008).

Neste processo por via úmida, que utiliza cinco vezes menos energia que o processo por via seca, a rocha fosfática concentrada é tratada com ácido sulfúrico e água, produzindo sulfato de cálcio hidratado (fosfogesso), ácido fosfórico e fluoreto de hidrogênio (CANUT, 2006), conforme demonstrado na reação:



fluorapatita	ácido	água	fosfogesso	ácido	fluoreto de
	sulfúrico			fosfórico	hidrogênio

A geração do fosfogesso em termos de massa é 4 a 6 vezes maior que a do próprio ácido fosfórico (CANUT, 2006).

Mesmo no processo por via úmida, a obtenção do ácido fosfórico pode acontecer por três processos diferentes:

- processo di-hidratado;
- processo hemi-hidratado;
- processo hemi di-hidratado.

O processo di-hidrato, apesar de ser o processo que produz ácido fosfórico em menor porcentagem e gerar o fosfogesso com maior teor de impurezas, é o processo mais empregado no Brasil, por necessitar de investimentos mais baixos (CHANG e MANTELL, 1990).

Na Figura 3 é mostrada uma fotografia aérea da planta de produção de ácido fosfórico da Vale Fertilizantes, onde todos os processos descritos ocorrem.

Durante a reação da rocha fosfática com o ácido sulfúrico, os radionuclídeos das séries de  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  que normalmente existem na rocha natural são separados. De acordo com a solubilidade dos radionuclídeos, alguns são incorporados ao ácido fosfórico enquanto outros permanecem no fosfogesso (SAUEIA *et al.*, 2005).



Figura 3 - Planta de produção de ácido fosfórico da Vale Fertilizantes

Fonte: VALE (2014)

### 2.2.2 Armazenamento do Fosfogesso

O resíduo da produção do ácido fosfórico, o fosfogesso, é gerado em grandes quantidades. Para cada tonelada de ácido fosfórico produzido, são geradas aproximadamente 4,5 toneladas de fosfogesso (PEREIRA, 2010). Este resíduo da produção de ácido fosfórico é descartado via úmida, em lagoas de sedimentação juntamente com a água residual da unidade industrial. Nas lagoas de sedimentação ele é decantado e depois de seco acumulado ao ar livre próximo à fábrica (FREITAS, 1992). Essas lagoas são mostradas na Figura 4.



Figura 4 – Lagoas de sedimentação

Fonte: COSTA (2011)

A água ácida das lagoas é escoada para “lagoas pulmões”, que também recebem água da chuva e encaminham a água para recirculação na planta da fábrica de ácido fosfórico. A água excedente das “lagoas pulmões” é enviada para estações de tratamento. Este tratamento para que a água contaminada torne-se própria para o consumo é muito caro e evitado pelos fabricantes de ácido fosfórico (CANUT, 2006).

Já o fosfogesso seco é encaminhado para áreas impermeabilizadas onde possa ser estocado ao ar livre (PEREIRA, 2010). Segundo a resolução 307/02 do CONAMA (2002), o gerador de resíduos deve garantir o confinamento dos resíduos desde a geração até a etapa de transporte, assegurando que sempre seja possível condições de reutilização e reciclagem.

Este tipo de estocagem representa altos custos para a empresa, devido às grandes áreas que ocupa e devido ao monitoramento do resíduo acumulado por

profissionais especializados (CANUT, 2006). Segundo Pereira (2010), este tipo de armazenamento acarreta problemas como:

- Contaminação atmosférica por fluoretos e outros elementos tóxicos;
- Lixiviação de materiais ácidos;
- Escoamento superficial;
- Erosão e instabilidade do resíduo acumulado;
- Poluição dos lençóis freáticos.

A quantidade de fosfogesso estocada no Brasil até meados de 1991 já era de 30 milhões de toneladas (MAZZILLI e SAUEIA, 1997), e em 2001 o maior depósito do mundo estava localizado no estado norte-americano da Flórida, com cerca de 1 bilhão de toneladas de fosfogesso armazenado (SILVA, 2001).

Além dos problemas do custo da estocagem, existem os problemas ambientais decorrentes do armazenamento e o risco de exposição e contaminação por radiação, tornando necessária uma alternativa viável para o reaproveitamento do fosfogesso depositado (COSTA, 2011).

### 2.2.3 Características do Fosfogesso

O fosfogesso apresenta características físicas e químicas similares ao gesso natural. O gesso natural é composto por sulfatos de cálcio di-hidratado, acompanhado de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos e magnésio (CANUT, 2006).

O fosfogesso também apresenta em sua composição sulfato de cálcio hidratado (BERISH, 1990) e é ácido devido aos resíduos de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido fluorídrico contidos nas porosidades. Porém, pode ser neutralizado pelo processo de lavagem e lixiviação com água. No fosfogesso também estão presentes impurezas como quartzo, fluoretos, fosfatos, matéria orgânica e minerais de alumínio e ferro (RUTHERFORD *et al.*, 1994), além de alguns radionuclídeos das séries naturais do urânio e do tório, dependendo da origem da rocha fosfática utilizada como matéria prima (MAZZILLI *et al.*, 2000). Na Tabela 2 é apresentada a composição química do fosfogesso obtido através dos três processos diferentes referenciados.

Tabela 2 – Composição química do fosfogesso

Elementos	Processos		
	Di-hidratado	Hemi-hidratado	Hemi di-hidratado
CaO (%)	32,5	36,9	32,2
SO <sub>3</sub> (%)	44,0	50,3	46,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,6	1,5	0,3
F (%)	1,2	0,8	0,5
SiO <sub>2</sub> (%)	0,5	0,7	0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,1	0,1	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,1	0,3	0,3
H <sub>2</sub> O cristalizada (%)	19,0	9,0	20,0

Fonte: CHANG e MANTELL, 1990

O teor de água livre no fosfogesso pode variar muito dependendo do tempo de drenagem da água que escoar pela pilha de fosfogesso e pelas condições meteorológicas locais. Este teor de água pode ser determinado comparando a pesagem do material úmido com a pesagem após a secagem a 60°C por 5 horas (AVERITT e GLIKSMAN, 1990).

As condições do processo de produção do ácido fosfórico influenciam na morfologia do cristal de fosfogesso, explicando os diferentes formatos de cristais encontrados e diferentes distribuições granulométricas, sendo a maior parte do fosfogesso composto por partículas siltosas (RUFO, 2009). O tipo da rocha fosfática, tamanho das partículas da rocha, concentração de ácido fosfórico, sólidos na pasta de gesso, excesso de ácido sulfúrico na pasta de gesso, impurezas da rocha, temperatura, entre outros, são fatores que controlam o formato e tamanho dos cristais de fosfogesso (BECKER, 1989).

### 2.3 FOSFOGESSO E A RADIAÇÃO

Segundo Canut (2006), o fosfogesso é classificado como um material TENORM e pode provocar impactos radiológicos devido ao fato de possuir em sua composição alguns radionuclídeos da série do urânio e do tório. Dentre esses radionuclídeos destaca-se o radônio, que, segundo a UNSCEAR (2000), é o

responsável por cerca de 50% de toda a radiação absorvida pelo homem. Na Figura 5 são apresentadas as séries de desintegrações dos isótopos naturais do radônio.

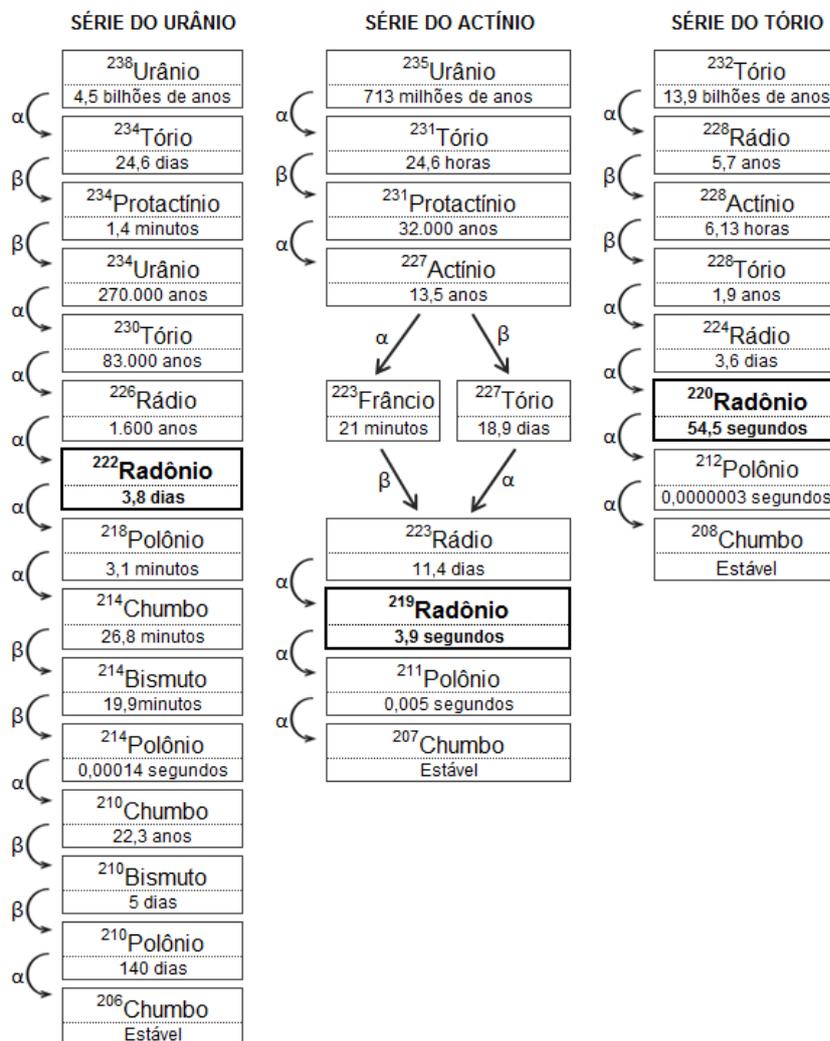


Figura 5 - Séries radioativas Naturais

Fonte: modificada de CNEN (2006)

Considerando que, segundo Rabi e Silva (2005), o gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), que é resultado do decaimento do  $^{226}\text{Ra}$ , é uma das impurezas mais comuns encontradas no fosfogesso e que dentre os radioisótopos do radônio, o  $^{222}\text{Rn}$  é o mais estudado devido ao fato de ter meia vida longa o suficiente (3,8 dias) para a sua detecção, o foco para esse trabalho será direcionado ao  $^{222}\text{Rn}$ , assunto que será discutido no próximo item.

### 2.3.1 Radônio - 222

O radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ) é um gás nobre originado do decaimento do  $^{238}\text{U}$  e, conseqüentemente  $^{226}\text{Ra}$ . Devido ao fato desses radionuclídeos serem provenientes do interior de rochas, solos e águas subterrâneas, o  $^{222}\text{Rn}$  é encontrado em todos os ambientes. O radônio é um gás cerca de sete a oito vezes mais pesado que o ar e, em razão disso, ocorre um acúmulo de  $^{222}\text{Rn}$  em altitude próxima ao solo que corresponde ao nível do ar respirado pelos seres humanos, facilitando assim, sua inalação (MARIA e SILVA, 2013).

Em ambientes fechados (*indoor*) onde a taxa de ventilação é baixa, o radônio pode atingir altos valores de concentração no local. Isso pode provocar impactos radiológicos devido ao fato do  $^{222}\text{Rn}$  ser um gás radioativo, que ao ser inalado ou ingerido, pode provocar danos às células dos tecidos biológicos podendo apresentar como resultado final dessa interação, principalmente, tumores pulmonares (RABI e SILVA, 2005).

Estudos mostram que o solo é o maior responsável pela contribuição na concentração ambiental por radônio e seus produtos de decaimentos. O fluxo de átomos de radônio vindo do solo depende das taxas de  $^{238}\text{U}$  presentes no solo e da resistência e permeabilidade que este oferece à difusão do gás (RIO DOCE, 1997). Além do solo, pode-se citar como outro responsável pela concentração de radônio no ambiente os materiais de construção, uma vez que esses materiais são formados por elementos constituintes da terra e das rochas.

#### 2.3.1.1 Radônio em materiais de construção

Os materiais de construção normalmente contêm níveis de  $^{238}\text{U}$  expressivos que, em combinação com a alta porosidade do material, permitem que o gás  $^{222}\text{Rn}$  escape e se concentre no interior dos ambientes. Dessa forma, os materiais de construção podem representar uma fonte importante de radônio *indoor* (RUOSTEENOJA, 1991).

Geralmente, os materiais de construção não representam fontes significativas de elevação dos níveis de radônio. Porém, em alguns casos, como materiais contaminados por rejeitos radioativos (ATSDR, 2000), os materiais de construção podem acrescer a concentração de radônio *indoor* em  $10\text{Bq/m}^3$  a

20Bq/m<sup>3</sup>, podendo chegar a valores de 1000Bq/m<sup>3</sup>, quando, segundo (ICRP, 1993), o nível de concentração limite recomendado para ambientes internos é inferior a 200Bq/m<sup>3</sup>.

O fluxo de <sup>222</sup>Rn oriundo de materiais é liberado por meio dos seguintes mecanismos: emanção, difusão, convecção e exalação, dentre esses mecanismos a emanção e exalação são as principais determinantes do fluxo dos materiais para a superfície (DEL CLARO, 2013). Na Figura 6 são ilustrados os principais mecanismos responsáveis pela liberação do radônio em ambientes *indoor*.

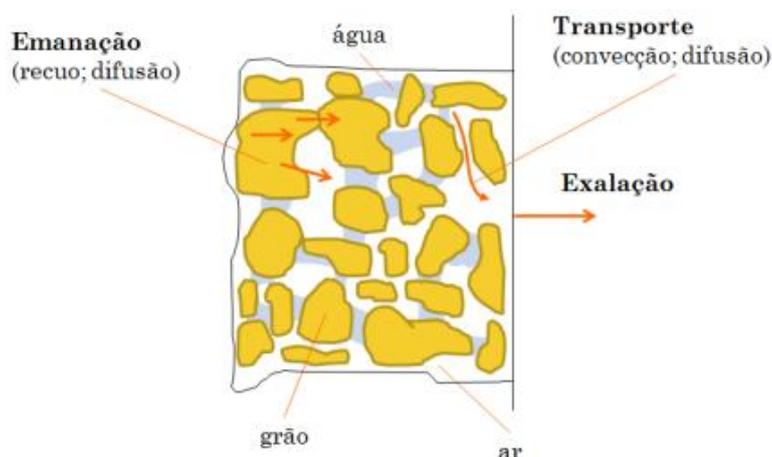


Figura 6 - Mecanismos de transporte do radônio em materiais de construção para ambiente *indoor*

Fonte: COSTA (2011)

A emanção define-se por a liberação do gás <sup>222</sup>Rn das partículas sólidas do material para os poros preenchidos com água ou ar (SOUZA, 2009);

O transporte de radônio, desde sua entrada no poro do material até a superfície pode ocorrer por difusão ou por convecção. A difusão é conhecida como transporte do radônio através dos poros existentes no material de modo que determinados isótopos atinjam a superfície antes de sofrer decaimento radioativo (PORSTENDÖRFER, 1993). E a convecção, segundo a UNSCEAR (1993), no caso de materiais de construção não é tão importante, já que, geralmente, são materiais que apresentam baixa permeabilidade.

O mecanismo de exalação corresponde ao transporte efetivo de transferência dos átomos de radônio presente nos poros dos materiais para o ambiente (SOUZA, 2009). O Fluxo de radônio proveniente da superfície do material

é caracterizado como taxa de exalação que pode ser medida em Bq/m<sup>3</sup>.s (UNSCEAR, 2000).

#### 2.3.1.2 Sistemas de detecção de Radônio

Por se tratar de um gás incolor, inodoro e insípido a presença do <sup>222</sup>Rn em temperatura ambiente só pode ser detectada e sua concentração medida através de equipamentos específicos capazes de contabilizar ou registrar a presença de partículas alfa, como é o caso de algumas câmaras de ionização, como por exemplo o AlphaGUARD da Saphymo, e de detectores de estado sólido de traços como o CR-39 (DEL CLARO, 2013).

### 2.4 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO

A crescente produção de ácido fosfórico demanda áreas cada vez maiores para a estocagem do fosfogesso, impulsionando a busca por formas viáveis de aplicação deste material. No Brasil, as principais aplicações do fosfogesso estão na agricultura, produção de cimento e na construção civil (VILLAVERDE, 2008).

#### 2.4.1 Aplicações na Agricultura

Atualmente, é a agricultura a maior consumidora de fosfogesso. Dados de 2004 mostram um consumo de 4,5 milhões de toneladas por ano neste setor (AQUINO, 2005). O fosfogesso, conhecido na agricultura como gesso agrícola, é largamente utilizado como fonte de nutrientes para plantas e como condicionador e melhorador de solos sódicos e solos argilosos (NUERNBERG *et al.*, 2005).

Nos Estados Unidos da América, a aplicação do fosfogesso na agricultura tem o seu uso limitado devido as impurezas e radionuclídeos contidos neste resíduo (VILLAVERDE, 2008). A “*U.S. Environmental Protection Agency*” (USEPA, 1992), permite a utilização do fosfogesso na agricultura somente se a concentração de <sup>226</sup>Ra for inferior a 370 Bq kg<sup>-1</sup>. No Brasil não existem regulamentações específicas sobre essa aplicação, existindo a necessidade de basear a conduta nas recomendações internacionais e em portaria do Ministério da Agricultura (VILLAVERDE, 2008).

#### 2.4.2 Aplicações na Produção de Cimento

Apesar do maior consumidor de fosfogesso ser a agricultura, a maior aplicação para a construção civil está na produção de cimento (AQUINO, 2005). Segundo Aquino (2005), o consumo de fosfogesso pelas indústrias cimenteiras chega a 1,7 milhões de toneladas por ano.

Para ser aplicado na produção de cimento, o fosfogesso deve apresentar pH superior a 4 e um teor de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) inferior a 0,8% (CANUT, 2006). Se tiver baixos valores de pH, pode contribuir para a despassivação de armaduras em estruturas de concreto armado e redução da resistência inicial do concreto (CANUT, 2006; CUNHA e HELENE, 2001). Já altos teores de ácido fosfórico causam o aumento do tempo de pega dos cimentos produzidos (CANUT, 2006).

O gesso natural é utilizado como adição ao clínquer com a função de controlar o tempo de pega, e sua aplicação se limita a, em geral, um teor de 3% de gesso para 97% de clínquer, em massa (ABCP, 2002). O fosfogesso é aplicado como substituto ao gesso natural. Apesar deste uso ser viável, a utilização depende da localização das indústrias fabricantes de ácido fosfórico em relação a localização das indústrias cimenteiras. No ano de 2000 eram utilizadas para este fim apenas 10% da quantidade total de fosfogesso disponível no Brasil (MAZZILLI *et al.*, 2000).

Em 2005, um grupo de pesquisa da Universidade Federal de Santa Catarina avaliou o uso do fosfogesso em um cimento sulfoaluminoso de baixo impacto ambiental (LUZ *et al.*, 2005). Foram estudadas diversas proporções entre o fosfogesso e o clínquer, sendo que a proporção com maior teor de fosfogesso a apresentar características mecânicas satisfatórias foi de 30% de clínquer sulfoaluminoso para 70% de fosfogesso.

#### 2.4.3 Aplicações na Construção Civil

O fosfogesso, devido à semelhança de suas propriedades físicas e químicas com o gesso natural, pode vir a substituir este na fabricação de diversos elementos empregados na construção civil, como placas, blocos, divisórias e revestimentos (CANUT, 2006).

Há um grande interesse em utilizar o fosfogesso substituindo o gesso natural, já que a utilização do fosfogesso reduziria os impactos ambientais causados pela exploração das jazidas naturais de gesso e pela estocagem do fosfogesso, além de baratear o custo da construção (VILLAVERDE, 2008).

Em alguns países, como nos Estados Unidos da América, o fosfogesso é utilizado na base e sub-base de pavimentos urbanos (CHANG e MANTELL, 1990). No Brasil, alguns grupos de pesquisa vêm estudando a possibilidade do aproveitamento do fosfogesso na construção civil (CANUT, 2006; RABI e SILVA, 2005; VILLAVERDE, 2008; COSTA *et al.*, 2010; COSTA, 2011). O estudo de Villaverde (2008) construiu uma habitação modelo com tetos e paredes compostos por placas pré-fabricadas a base de fosfogesso. Foram avaliadas as doses decorrentes da exposição externa à radiação gama e da inalação de radônio para moradores que viessem a ocupar o local. Os resultados mostram que a utilização do material é segura, mas requer mais estudos sobre os níveis de radônio no interior da residência.

Os estudos para aproveitamento do fosfogesso em maior escala na construção civil focam na proteção radiológica, sendo também necessária a verificação das características físicas e mecânicas dos produtos fabricados com o fosfogesso, além da confirmação dos níveis de radônio a que moradores estariam expostos (CANUT, 2006; VILLAVERDE, 2008).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho, apresentada a seguir, foi elaborada para caracterizar algumas propriedades do resíduo fosfogesso, visando sua aplicação na construção civil, como placas pré-moldadas de argamassa de fosfogesso e como pasta para revestimento.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Fosfogesso

Para a realização do presente trabalho foi utilizado o fosfogesso disponibilizado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O material encontrava-se armazenado abrigado da umidade, em sacos plásticos vedados.

Antes da utilização do material, o fosfogesso foi seco em estufa e apenas as partículas passantes na peneira com abertura de 2,34 mm foram utilizadas. Este foi o único beneficiamento dado ao resíduo fosfogesso.

##### 3.1.2 Gesso

O gesso utilizado no presente trabalho foi o *Qualigesso 30*, gesso de pega rápida utilizado para pré-moldados e decoração. Este gesso é comercializado em embalagens de 40 kg e também foi armazenado abrigado da umidade.

##### 3.1.3 Areia

A areia utilizada, fornecida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, é de origem natural e com módulo de finura de 3,36. A areia foi peneirada e foi utilizada somente a parcela passante pela peneira com abertura de 2,34 mm. Foi também determinada sua umidade no dia da utilização para a correção da quantidade de água a ser adicionada.

### 3.1.4 Água

Foi utilizada água da rede pública de abastecimento, disponibilizada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

## 3.2 MÉTODOS

Para a confecção dos objetos de estudo foram necessários procedimentos iniciais de preparação do local e do ambiente, incluindo:

- Montagem das células teste, de acordo com os procedimentos elaborados por Maria e Silva (2013) e limpeza;
- Confecção de fôrmas de madeira para as placas pré-moldadas;
- Preparação, pesagem e transporte dos materiais necessários para a confecção da pasta e da argamassa;
- Limpeza dos laboratórios e instrumentos utilizados.

### 3.2.1 Composições Previstas

Inicialmente foi prevista a confecção da pasta de fosfogesso e água e da argamassa de fosfogesso, areia e água. Nos itens seguintes são apresentados os procedimentos utilizados durante a etapa de execução das composições.

#### 3.2.1.1 Fosfogesso e água

Esta composição de fosfogesso foi elaborada somente com os materiais fosfogesso e água, para ser utilizada como pasta para revestimento. A relação água/aglomerante, no caso o fosfogesso, foi determinada seguindo uma adaptação do ensaio de consistência normal de pastas de cimento Portland, descrita na NBR NM 43 – Cimento portland – Determinação da pasta de consistência normal (ABNT, 2003). A relação água/fosfogesso obtida, de 0,2824, foi utilizada para a confecção dos corpos de prova de pasta de fosfogesso.

Foram moldados 6 corpos de prova com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, para a realização do ensaio de resistência à compressão. Antes de receber a pasta de fosfogesso foi aplicado desmoldante nos moldes dos corpos de prova utilizados.

A pasta de fosfogesso foi colocada no molde em três camadas, recebendo 30 golpes de soquete entre cada camada para evitar a presença de bolhas de ar. Na figura 7 é mostrado o corpo de prova moldado com pasta de fosfogesso.



Figura 7 - Corpo de prova de pasta de fosfogesso

Os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente e condições normais de umidade e pressão. Os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 21 dias, até ganharem resistência suficiente para serem desmoldados.

Mesmo esperando 21 dias para desmoldar, alguns corpos de prova se romperam enquanto eram desmoldados.

#### 3.2.1.2 Fosfogesso, areia e água

A argamassa de fosfogesso, areia e água foi confeccionada com o traço em massa de 1:3 (1 unidade de massa de fosfogesso para 3 unidades de massa de areia) seguindo as indicações e recomendações para argamassas de gesso natural das normas norte americanas ASTM C 28-10 (ASTM, 2010a) e ASTM C 842-05 (ASTM, 2010b). A relação água/fosfogesso adotada foi de 0,48. Para possibilitar o uso de uma relação água/fosfogesso baixa foi necessário o uso de aditivo plastificante na quantidade de 5% da massa do fosfogesso.

Essa composição foi utilizada para moldar 6 corpos de prova e 7 placas pré-moldadas. Os corpos de prova foram moldados para a realização do ensaio de

resistência à compressão, enquanto as placas foram moldadas para a realização do ensaio de resistência à flexão e para revestir um dos ambientes célula-teste.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme descrito no item anterior, e estes podem ser vistos na figura 8. As placas pré-moldadas foram moldadas em formas de madeira, com as dimensões das paredes do ambiente célula-teste, após esta receber duas camadas de cera como desmoldante. A moldagem aconteceu com a ajuda de uma colher de pedreiro. Na figura 9 são mostradas as placas de argamassa de fosfogesso moldadas.



Figura 8 - Corpo de prova de argamassa de fosfogesso e areia



Figura 9 - Placas de argamassa de fosfogesso e areia

Os corpos de prova e as placas foram curados por 21 dias em seus moldes em temperatura ambiente e condições normais de umidade e pressão.

Após os 21 dias os corpos de prova foram desmoldados, alguns se rompendo durante esta operação. As placas pré-moldadas não foram desmoldadas devido à presença de diversas trincas profundas.

### 3.2.2 Composições Alternativas

Devido à insuficiência de ganho de resistência da argamassa de fosfogesso, não foi possível a realização dos ensaios no estado endurecido. Também não foi viável a aplicação da pasta de fosfogesso como revestimento da célula-teste e da argamassa de fosfogesso como placa pré-moldada. Apenas alguns corpos de prova de pasta de fosfogesso puderam ser utilizados para o ensaio de resistência à compressão.

Para dar continuidade ao estudo de aplicação do fosfogesso na construção civil, foram criadas novas composições alternativas com a utilização de gesso natural para suprir a falta de resistência do fosfogesso como aglomerante.

Nos itens seguintes são apresentados os procedimentos utilizados durante a etapa de execução destas novas composições.

#### 3.2.2.1 Gesso e água

Foi confeccionada a pasta de gesso e água para que seja possível a comparação entre os resultados obtidos dos ensaios com as outras composições incluindo o fosfogesso. Esta composição atua como um controle.

A pasta de gesso e água foi confeccionada de acordo com as recomendações do fabricante do gesso utilizado. Foi utilizada uma relação água/gesso igual a 0,75. O gesso foi colocado em um recipiente junto com a água e deixado em repouso por aproximadamente 1 minuto, depois foi misturado com ajuda de uma espátula até obtenção de uma pasta homogênea.

Essa composição foi utilizada para moldar 8 corpos de prova cilíndricos 10x5cm e para revestir uma das células teste. Os corpos de prova foram utilizados para realização de ensaios de resistência e absorção em laboratório e o ambiente-teste foi revestido para a realização de medições de concentração de radônio.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme descrito nos itens anteriores, com exceção dos 30 golpes de soquete que não foram necessários devido à plasticidade inicial apresentada pela pasta, substituídos pela vibração do molde para garantir a isenção de bolhas de ar. Após limpeza, as células teste foram revestidas com a pasta de gesso e água com ajuda de uma espátula de plástico.

Os corpos de prova e o revestimento do ambiente-teste foram curados em temperatura ambiente e condições normais de umidade e pressão e foram desmoldados após 3 dias de cura.

### 3.2.2.2 Fosfogesso, gesso e água

Para confecção da pasta de fosfogesso, gesso e água, foram seguidos os mesmos procedimentos do item anterior, porém foi substituído 5% da massa do gesso por fosfogesso. Esta proporção se deve à informação obtida no II Seminário Sobre Radônio no Brasil (2014), no qual foi discutida a norma do uso de fosfogesso que ainda está sob aprovação.

A composição confeccionada foi utilizada para moldar 10 corpos de prova cilíndricos 10x5cm e para revestir uma das células teste. Os corpos de prova foram utilizados para realização dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção em laboratório e o ambiente-teste revestido para a realização de medições de concentração de radônio.

Os corpos de prova e o revestimento da célula-teste foram curados em temperatura ambiente e condições normais de umidade e pressão e, após 3 dias os corpos de prova foram desmoldados.

### 3.2.3 Ensaios Realizados

Alguns ensaios previstos inicialmente não foram realizados devido aos problemas encontrados com os corpos de prova de fosfogesso e água e de argamassa de fosfogesso, aos atrasos causados pelos problemas e à falta de equipamentos necessários para a realização de alguns ensaios.

Os ensaios que foram realizados se basearam em normas brasileiras ou internacionais e são descritos nos tópicos seguintes. Alguns procedimentos das normas foram adaptados para o ensaio ser realizado com o material fosfogesso, de

modo a simular a realidade da aplicação. Todos os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, com os equipamentos disponibilizados por ela.

#### 3.2.4 Consistência Normal da Pasta

A consistência normal da pasta de fosfogesso foi obtida a partir da metodologia de ensaio descrito pela norma NBR NM 43 – Cimento portland – Determinação da pasta de consistência normal (ABNT, 2003). Foram utilizados os equipamentos especificados na norma para a realização deste ensaio, sendo eles o molde tronco-cônico e o aparelho de Vicat com sonda de Tetmajer. Os procedimentos descritos na norma foram seguidos, adaptando-se somente o material a ter sua consistência normal determinada, neste caso a pasta de fosfogesso e não a pasta de cimento. Essa adaptação foi realizada devido à dificuldade na obtenção da sonda cônica necessária para a determinação da consistência normal da pasta de gesso, conforme descrito pela norma NBR 12128 – Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta (ABNT, 1991a).

Segundo a norma NBR NM 43 (ABNT, 2003), a pasta é considerada de consistência normal quando a sonda se situa a uma distância de  $6 \pm 1$  mm da placa base após 30 s do instante em que foi solta.

Este ensaio foi realizado apenas para a pasta de fosfogesso e água, já que quando utilizado o gesso natural seguiu-se as recomendações do fabricante quanto à relação água/gesso.

Na figura 10 pode ser visto o registro de uma etapa do ensaio de consistência normal, com o aparelho de Vicat, a sonda de Tetmajer e a pasta de fosfogesso e água com consistência normal.



Figura 10 - Ensaio de consistência normal

### 3.2.5 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com um total de nove corpos de prova, sendo três corpos de prova de pasta de fosfogesso puro, três corpos de prova de pasta com 95% de gesso e 5% de fosfogesso e três corpos de prova de gesso natural puro. Todos os corpos de prova foram rompidos com idades superiores aos 28 dias, ou seja, representando a resistência final da peça. Os corpos de prova de argamassa de fosfogesso não apresentaram resistência suficiente para serem desmoldados sem danos, e, por este motivo, não foram ensaiados.

Para a realização do ensaio, a norma NBR 7215 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ABNT, 1996) foi tomada como base, adaptando-se somente o material a ser testado. Os corpos de prova utilizados neste ensaio possuem o diâmetro interno de 5 cm e altura de 10 cm, conforme especificado na norma. Para romper os corpos de prova foi utilizada a prensa disponibilizada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, mostrada na figura 11.



Figura 11 - Ensaio de resistência à compressão axial

### 3.2.6 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado a partir de uma adaptação da norma NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado para caracterizar somente corpos de prova confeccionados com pasta de 95% de gesso e 5% de fosfogesso. Foi determinada a resistência à tração de dois corpos de prova cilíndricos com dimensões 5x10cm e com idades superiores aos 28 dias, ou seja, representando a resistência final da peça. Para romper os corpos de prova foi utilizada a prensa disponibilizada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Na figura 12 é mostrada a execução do ensaio.



Figura 12 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

### 3.2.7 Absorção de Água

A absorção de água foi determinada seguindo as recomendações da NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica (ABNT, 2009). O ensaio foi realizado com um total de seis corpos de prova, sendo três corpos de prova de pasta de 95% de gesso e 5% de fosfogesso e três corpos de prova de pasta de gesso.

Para realização do ensaio obteve-se a massa dos seis corpos de prova secos, que posteriormente foram deixados imersos em água durante três dias. Foi determinada a massa dos corpos de prova saturados e a partir dessas informações calculou-se a relação entre a massa do corpo de prova saturado e a massa do corpo de prova seco. Na figura 13, pode-se observar os corpos de prova imersos em água para a realização do ensaio.



Figura 13 - Ensaio de absorção de água

### 3.2.8 Medidas de Radônio com Detector Passivo

O detector utilizado foi o CR-39, que é constituído de material plástico de polietileno capaz de registrar partículas alfa emitidas pelo gás  $^{222}\text{Rn}$  durante seu decaimento. Toda a área do detector é sensível para a detecção e, por ser um material transparente, permite a visualização, após a revelação química, de traços devido às interações das partículas alfa com o material detector.

Para a realização das medidas de concentração de radônio no interior dos ambientes testes foram alocados, durante 13 dias, cinco detectores dentro da célula-teste revestida com pasta de gesso e água e cinco detectores no interior da célula-

teste revestida com pasta de fosfogesso, gesso e água. O CR-39 foi disponibilizado pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Na figura 14 é mostrado o detector passivo utilizado na realização do ensaio, e nas figuras 15 e 16 são mostrados os ambientes célula-teste revestidos com pasta de fosfogesso e gesso e com pasta de gesso puro, respectivamente.



Figura 14 - Detector passivo de radônio

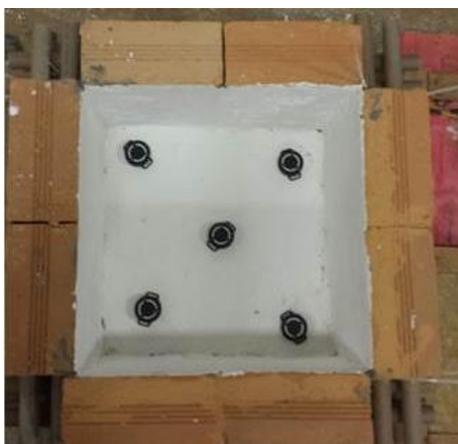


Figura 15 - Célula-teste revestida com pasta de fosfogesso e gesso



Figura 16 - Célula-teste revestida com pasta de gesso

Após a realização das medidas os detectores passaram por um processo de revelação para possibilitar a visualização dos traços de radiação com auxílio de um microscópio óptico. Posteriormente realizou-se a contagem dos traços de cada detector considerando uma área de 0,5625cm<sup>2</sup>.

### 3.2.8.1 Cálculo da concentração de radônio nas células-teste

Com os valores obtidos com a contagem de traços de radioatividade no CR-39 foi calculada a densidade de traços por cm<sup>2</sup> de cada detector (Eq. 3.1).

$$Densidade = \frac{n^{\circ} \text{ de traços}}{\text{área do detector}} = \frac{n^{\circ} \text{ de traços}}{0,5625} \text{ (n}^{\circ} \text{ de traços/cm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

O valor obtido para densidade de traços por cm<sup>2</sup> de cada detector foi dividido pelo tempo de exposição do detector em horas, assim obteve-se o número de traços por cm<sup>2</sup> por hora de cada detector (Eq. 3.2).

$$\frac{Densidade}{horas} = \frac{densidade}{horas \text{ de exposição}} = \frac{densidade}{13 \text{ dias} \times 24 \text{ horas}} \text{ (n}^{\circ} \text{ de traços/cm}^2 \cdot \text{h)} \quad (3.2)$$

Utilizando estes valores, foi calculada a média de concentração da atividade de radônio dentro de cada célula-teste (Eq. 3.3).

$$Média = \frac{\sum(Densidade / horas)}{n^{\circ} \text{ de detectores}} = \frac{\sum(Densidade / horas)}{5} \text{ (n}^{\circ} \text{ de traços/cm}^2 \cdot \text{h)} \quad (3.3)$$

O Laboratório de Física Nuclear da UTFPR estabeleceu a calibração do sistema detector (Corrêa, 2011) e a concentração de radônio em Bq/m<sup>3</sup> do local medido foi obtida através da equação 3.4:

$$C = (405 \pm 30) \times n \text{ (Bq.cm}^2 \cdot \text{h.m}^{-3}\text{)} \quad (3.4)$$

Onde n é o número de traços/hora de exposição em 1cm<sup>2</sup> do detector.

Para utilização da equação 3.4 foi utilizada a teoria da propagação de incertezas que tem como base a seguinte função (Eq. 3.5):

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \dots \quad (3.5)$$

Posteriormente à realização do cálculo para encontrar a concentração de radônio nas células testes, como a razão entre a área de superfície do revestimento e o volume da célula-teste é muito maior do que a razão entre a área de superfície de um cômodo real e seu volume, foi necessário a utilização de um fator de correção (Eq 3.6):

$$\text{Fator de correção} = \frac{(\text{área revestida/volume célula teste})}{(\text{área cômodo real/volume cômodo real})} \quad (3.6)$$

Multiplicando o fator de correção pelo resultado encontrado na equação 3.4 obteve-se os valores de concentração de Rn<sup>222</sup> no interior de cada célula-teste.

### 3.2.9 Medidas de Radônio com Detector Ativo

O AlphaGUARD é um equipamento portátil, não sensível à umidade e vibrações, sendo composto por uma câmara de ionização geometricamente projetada para fornecer monitoramento contínuo de e as medidas de concentração de radônio na faixa entre 2 a 2.000.000 Bq/m<sup>3</sup>. Possui também um conjunto de sensores que fornece dados ambientais como umidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura (SAPHYMO, 2012).

Para obtenção das medidas de concentração de radônio proveniente do revestimento de pasta de gesso e água e do revestimento de pasta de gesso, fosfogesso e água, o equipamento foi colocado dentro de cada célula-teste por aproximadamente duas horas e meia. Posteriormente à realização das medições, foi aplicado o mesmo fator de correção aplicado nos resultados obtidos com o detector CR-39 (Eq. 3.6):

$$\text{Fator de correção} = \frac{(\text{área revestida/volume célula teste})}{(\text{área cômodo real/volume cômodo real})} \quad (3.6)$$

O AlphaGUARD foi disponibilizado pelo Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Na figura 17 é mostrado o

equipamento no ambiente célula-teste revestido com pasta de 5% fosfogesso e 95% gesso.



Figura 17 - Medidor ativo no ambiente-teste

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ENSAIO DE CONSISTÊNCIA NORMAL DA PASTA

Através do ensaio de consistência normal realizado com a pasta de fosfogesso puro e água foi obtida a relação água/fosfogesso que apresenta trabalhabilidade adequada à aplicação. Foi obtida a relação água/fosfogesso de 0,2824 quando a sonda de Tetmajer estacionou-se a 7 mm da base do molde. Essa relação água/fosfogesso apresenta-se muito inferior à relação água/gesso indicada pelo fabricante de gesso, indicando uma mistura rica em aglomerante.

### 4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial realizados em idades superiores aos 28 dias podem ser visualizados na tabela 3. Foram ensaiados três corpos de prova de pasta de fosfogesso puro, três corpos de prova de pasta de 95% de gesso e 5% de fosfogesso e três corpos de prova de gesso puro.

Tabela 3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial

Composição	Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	Erro final (MPa)
Pasta de Fosfogesso e Água	CP 1	682,83	69,63	0,350	0,343	0,009
	CP 2	662,75	67,58	0,350		
	CP 3	652,71	66,56	0,330		
Pasta de 95% Gesso, 5% Fosfogesso e Água	CP 4	12552,04	1279,95	6,4	5,5	0,7
	CP 5	10614,00	1082,33	5,4		
	CP 6	8967,17	914,40	4,6		
Pasta de Gesso e Água	CP 7	16026,44	1634,24	8,2	8,8	0,4
	CP 8	17693,35	1804,22	9,0		
	CP 9	18135,18	1849,27	9,2		

Devido à geometria dos corpos de prova utilizados, cilíndricos, os resultados obtidos não podem ser comparados diretamente com as resistências mínimas

especificadas para a pasta de gesso natural na norma NBR 13207 – Gesso para construção civil (ABNT, 1994), pois segundo a norma NBR 12129 – Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas (ABNT, 1991b) devem ser utilizados corpos de prova cúbicos com lado de 50 mm para a determinação da resistência à compressão do gesso. Segundo a norma britânica BS EN 1992-1-1:2004 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings (BSi, 2004), corpos de prova cilíndricos geralmente apresentam resistências inferiores aos corpos de prova cúbicos. Considerando esta condição e utilizando os resultados obtidos de forma conservadora, comparou-se os resultados com os valores mínimos impostos por norma, notando-se que a única composição que atingiu resistência superior aos 8,40 MPa especificados foi a composição de gesso natural puro, com 8,80 MPa. Os corpos de provas com 5% de fosfogesso em substituição ao gesso natural apresentaram resistência média à compressão de 5,46 MPa, 38% menor do que a resistência do corpo de prova com 100% de gesso natural.

Na figura 18 são mostrados os corpos de prova rompidos após o ensaio de resistência à compressão axial.



Figura 18 - Corpos de prova rompidos por compressão

Analisando a tabela com os resultados do ensaio de resistência à compressão axial, nota-se que a pasta de fosfogesso puro apresentou ganho de resistência muito inferior ao ganho apresentado pela pasta de gesso. A composição com 95% de gesso e 5% de fosfogesso também apresentou resistência à compressão inferior à do gesso comum, mesmo com a substituição de apenas 5% da massa do gesso por fosfogesso. Nota-se, a partir dos resultados, que o fosfogesso prejudicou o ganho de resistência da pasta.

### 4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Através da compressão diametral dos corpos de prova com composição de 5% de fosfogesso e 95% de gesso, pôde-se determinar a resistência à tração deste material. Os resultados dos dois corpos de prova ensaiados são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Composição	Corpo de prova	Força máxima (N)	Força máxima (kgf)	Tensão (MPa)	Média (Mpa)	Erro final (MPa)
Pasta de 95% Gesso, 5% Fosfogesso e Água	CP 11	6245,89	636,90	0,80	0,81	0,02
	CP 12	6416,60	654,31	0,82		

A partir dos resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, pode-se notar que os corpos de prova da composição de 95% de gesso e 5% de fosfogesso apresentam resistência à tração de aproximadamente 15% da resistência à compressão.

Na figura 19 é mostrado o corpo de prova após o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

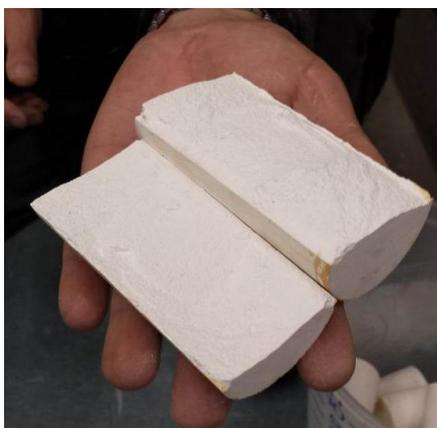


Figura 19 - Corpo de prova rompido por tração

#### 4.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

A partir do ensaio de absorção de água por imersão total dos corpos de prova de pasta de pasta de 5% de fosfogesso e 95% de gesso e dos corpos de prova de pasta de gesso, pôde-se determinar a relação entre a massa do corpo de prova saturado e a massa do corpo de prova seco. Os resultados dos corpos de prova ensaiados são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão

<b>Composição</b>	<b>Corpo de prova</b>	<b>Peso seco (g)</b>	<b>Peso saturado (g)</b>	<b>Variação de peso (g)</b>	<b>Absorção</b>	<b>Média</b>	<b>Erro final</b>
Pasta de 95% Gesso, 5% Fosfogesso e Água	CP 13	197,8	277,6	79,8	40%	40%	1,0%
	CP 14	198,4	274	75,6	38%		
	CP 15	197,4	277,4	80	41%		
Pasta de Gesso e Água	CP 16	214,5	279,9	65,4	30%	29%	3%
	CP 17	212,9	279,7	66,8	31%		
	CP 18	226,4	280,8	54,4	24%		

Após a realização do ensaio de absorção de água por imersão pode-se observar que não houve deterioração de nenhum dos corpos de prova submetidos ao ensaio. Também pode-se notar que os corpos de prova com 5% de fosfogesso apresentaram maior absorção de água do que os corpos de prova de pasta de gesso natural puro. Tal fato indica a maior presença de vazios nos corpos de prova de 5% fosfogesso e 95% gesso, o que também explica a menor resistência à compressão apresentada por esta composição. Na figura 20 pode-se observar os corpos de prova de 5% fosfogesso e 95% gesso após a realização do ensaio de absorção, sem apresentar deterioração.



Figura 20 - Corpos de prova após a realização do ensaio de absorção

#### 4.5 MEDIÇÃO DE RADÔNIO COM DETECTOR PASSIVO

Através das medições realizadas utilizando o detector passivo CR-39 foi obtida a contagem de traços de radioatividade em cada detector. Com esses dados foi possível calcular uma média de concentração de radônio dentro de cada ambiente-teste. Os resultados das medições e dos cálculos correspondentes são mostrados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do detector CR-39

Composição do revestimento da célula-teste	Câmara	Nº de traços	Densidade de traços (Nº de traços/cm <sup>2</sup> )	Concentração média nos ambientes (Bq/m <sup>3</sup> )	Erro da concentração média (Bq/m <sup>3</sup> )
Pasta de 95% Gesso, 5% Fosfogesso e Água	01	302	536,89	76,3	7,0
	02	312	554,67		
	03	250	444,44		
	04	343	609,78		
	05	337	599,11		
Pasta de Gesso e Água	06	233	414,22	34,8	6,8
	07	118	209,78		
	08	120	213,33		
	09	119	211,56		
	10	93	165,33		

A partir dos valores calculados foi aplicada a teoria dos erros utilizando intervalos de desvio padrão para a comparação entre os valores correspondentes à concentração de radônio da célula-teste revestida com pasta de gesso e da concentração de radônio da célula-teste revestida com pasta de 5% fosfogesso e 95% gesso. Segundo Tuginho Filho e Andrello (2009), o desvio padrão ( $\sigma$ ) é uma medida que fornece intervalos que indicam qual a probabilidade de encontrar valores nesse intervalo se o experimento for repetido. Na tabela 7 é apresentada a probabilidade de encontrar a medida dentro do valor em relação aos intervalos limitados por valores inteiros de desvio padrão.

Tabela 7 – Relação entre o intervalo da variável e a probabilidade de encontrar a medida dentro do intervalo.

Intervalo	Probabilidade
$[-\sigma, +\sigma]$	68,3%
$[-2\sigma, +2\sigma]$	95,4%
$[-3\sigma, +3\sigma]$	99,7%

Fonte: modificada de TOGINHO FILHO e ANDRELLO (2009)

Para comparação dos resultados de concentração de radônio no interior de cada ambiente-teste foram utilizados 3 desvios padrões. A comparação é mostrada na figura 21.

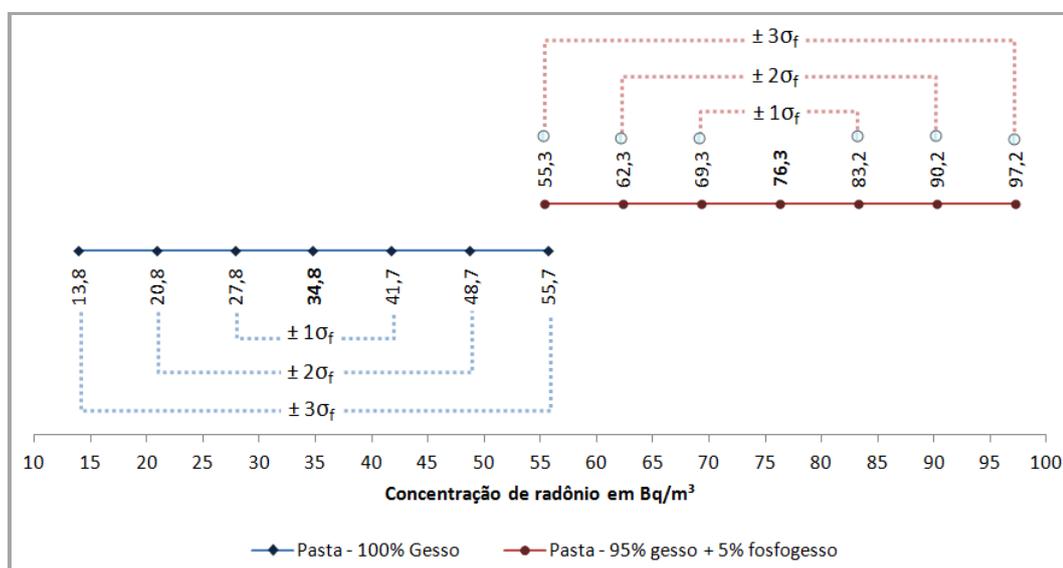


Figura 21 – Comparativo dos resultados de concentração de radônio – CR-39

Observa-se que, apenas nos intervalos limitados com 3 desvios padrões os valores se sobrepõem. Com isso, segundo a teoria dos erros, é possível afirmar que com cerca de 99% de probabilidade, a concentração média de radônio encontrada na célula-teste revestida com pasta de 95% de gesso e 5% de fosfogesso é maior do que a concentração média de radônio encontrada na célula-teste revestida com pasta gesso.

#### 4.6 MEDIÇÃO DE RADÔNIO COM DETECTOR ATIVO

A utilização do detector ativo AlphaGUARD foi feita para obter valores para comparação da concentração de atividade de radônio, em relação aos valores obtidos com o CR-39. Os resultados das medições correspondentes foram fornecidos pelo equipamento e são mostrados na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados do detector AlphaGUARD

Composição do revestimento da célula-teste	Tempo de duração da medição	Concentração nos ambientes	Erro da concentração
	(min)	(Bq/m <sup>3</sup> )	(Bq/m <sup>3</sup> )
Pasta de 95% Gesso, 5% Fosfogesso e Água	120	6,8	2,5
Pasta de Gesso e Água	110	4,0	1,6

A partir dos valores obtidos com a medição foi aplicada a teoria dos erros para a comparação entre os valores correspondentes à concentração de radônio nas duas células teste, utilizado um desvio padrão. A comparação é mostrada na figura 22.

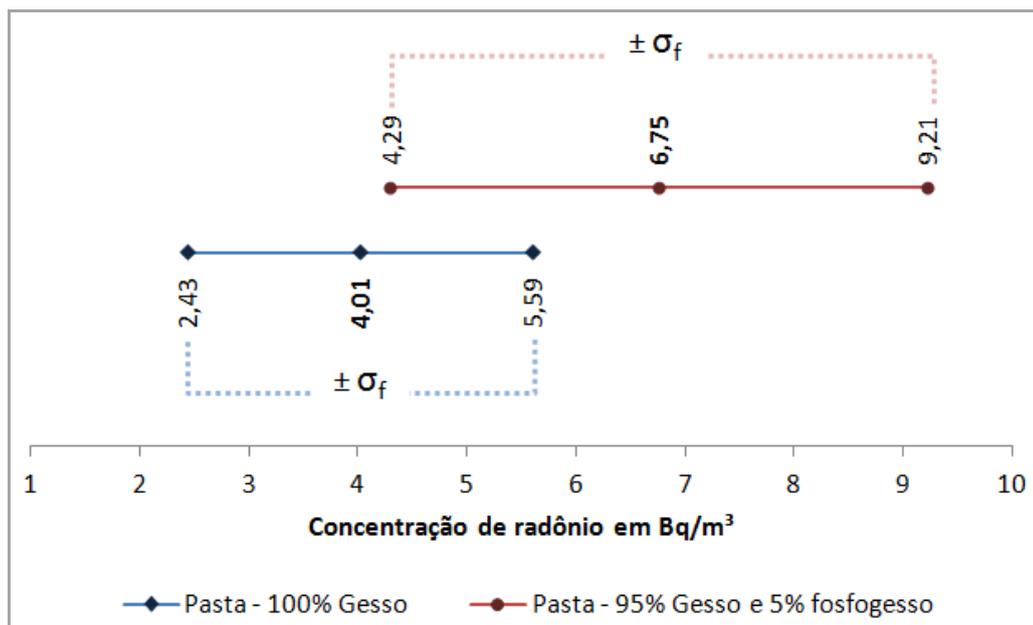


Figura 22 – Comparativo dos resultados de concentração de radônio – AlphaGUARD

Observa-se que os valores de concentração obtidos com o detector AlphaGUARD foram inferiores aos valores obtidos com o detector CR-39, pois, provavelmente, o tempo de medição com o detector ativo não foi o suficiente para registrar o real valor de concentração de radônio no interior das células-teste. Além disto, percebe-se que nos intervalos limitados com apenas um desvio padrão os valores se sobrepõem, o que indica que, segundo a teoria dos erros, não é possível afirmar que a concentração média de radônio encontrada na célula-teste revestida com pasta de 95% de gesso e 5% de fosfogesso é maior do que a concentração média de radônio encontrada na célula-teste revestida com pasta de gesso.

Levando em consideração estes fatos e que o detector passivo CR-39 apresenta maior precisão que o detector ativo, os valores obtidos durante a medição realizada com o AlphaGUARD não foram levados em consideração para elaboração da conclusão.

#### 4.7 OBSERVAÇÕES GERAIS

Durante o processo de fabricação das composições mencionadas neste trabalho e durante a realização dos ensaios foram notadas algumas características dos materiais importantes de serem mencionadas. São elas:

- O tempo de final de pega e conseqüentemente o tempo de cura do fosfogesso é muito superior ao valor estabelecido em norma (ABNT, 1994). Na pesquisa de Canut (2006), o tempo de final de pega de uma composição de 100% de fosfogesso foi de 6 dias e 12 horas. Devido a este longo período de ganho de resistência inicial do fosfogesso os corpos de prova foram desmoldados após 21 dias de cura em condições normais de temperatura, umidade e pressão.
- A pasta de fosfogesso puro apresentou baixo ganho de resistência. Alguns dos corpos de prova apresentaram fissuras e se desintegraram após o manuseio. Na figura 23 podem ser observadas as fissuras presentes no corpo de prova de pasta de fosfogesso.



Figura 23 - Corpo de prova de pasta de fosfogesso com fissuras

- A argamassa de fosfogesso e areia apresentou baixo ganho de resistência e mesmo após os 21 dias de cura dentro do molde os corpos de prova se romperam quando desmoldados, como mostrado na figura 24. Para dar continuidade à pesquisa foi utilizado aditivo plastificante para reduzir a relação água/fosfogesso e assim aumentar a resistência da argamassa. Mesmo com esta alteração, a argamassa de fosfogesso não apresentou resistência suficiente para o corpo de prova e a placa serem desmoldados sem danos.



Figura 24 - Corpo de prova de argamassa de fosfogesso sendo desmoldado

- As placas moldadas com argamassa de fosfogesso, areia e água não foram desmoldadas, devido à baixa resistência apresentada pelos corpos de prova desta mesma composição e devido à presença de grandes fissuras na superfície destas placas pré-moldadas. Na figura 25 são mostradas as placas depois de curadas por 21 dias.



Figura 25 - Placa pré-moldada fissurada

- O fosfogesso mostrou-se corrosivo, sendo observados diversos pontos de corrosão nos moldes utilizados para os corpos de prova. A corrosão foi observada tanto nos moldes empregados para os corpos de prova de pasta de fosfogesso quanto nos moldes empregados

para os corpos de prova de argamassa de fosfogesso e areia. Na figura 26 pode-se observar os moldes corroídos apenas 3 dias após a moldagem.



Figura 26 - Corrosão dos moldes

- As duas composições que levam gesso natural apresentaram alto calor de hidratação, enquanto a pasta de 100% fosfogesso não apresentou calor considerável durante a hidratação.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise dos resultados dos ensaios realizados neste estudo, pôde-se obter informações importantes sobre o fosfogesso. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão mostram que o fosfogesso como aglomerante apresenta resistência muito inferior ao requerido por norma para pasta de gesso natural. A pasta feita com 100% de fosfogesso e relação água/fosfogesso determinada por meio de ensaio de consistência normal mostrou-se inviável para a utilização, devido ao tempo necessário para o início e final de pega ser muito superior aos valores estabelecidos por norma e devido à resistência à compressão apresentada ser muito inferior à resistência mínima especificada em norma.

A argamassa produzida com fosfogesso, areia e água também mostrou-se inviável. Não foram obtidos valores para a resistência dessa argamassa pois os corpos de prova foram muito danificados ou rompidos durante a retirada dos moldes e as placas pré-moldadas apresentaram grandes fissuras, não sendo possível a realização dos ensaios de resistência à compressão e à tração.

Já a pasta composta de 5% de fosfogesso e 95% de gesso natural, apesar de apresentar resistência à compressão inferior à resistência requerida por norma para pastas de gesso natural, apresenta resistência à compressão compatível com aplicações que não demandam alta resistência da peça, como vedações, revestimentos e pré-moldados decorativos.

Ao realizar o ensaio de resistência à compressão para a pasta de gesso natural puro, foi possível obter resultados superiores ao mínimo recomendado em norma, mostrando que o gesso utilizado encontrava-se em condições corretas para uso e que a relação água/gesso recomendada pelo fabricante de gesso era adequada para o gesso utilizado.

Com os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado com os corpos de prova de pasta composta de 5% gesso e 95% fosfogesso, se observou que o comportamento apresentado pela composição em relação à tração é de aproximadamente 15% da resistência à compressão axial.

Quanto à absorção de água, a pasta de 5% fosfogesso e 95% gesso apresentou absorção superior à absorção da pasta de 100% de gesso natural. Tal

resultado indica maior presença de vazios na pasta com fosfogesso, o que confirma os resultados dos ensaios de resistência. Pastas com maior número de vazios, além de absorverem mais água, apresentam menores resistências.

Do ponto de vista radiológico, a célula-teste revestida com pasta composta de 5% de fosfogesso e 95% de gesso natural apresentou concentração de radônio superior à encontrada na célula-teste revestida com pasta de gesso natural. Porém, como a concentração obtida não ultrapassa o valor de 200Bq/m<sup>3</sup>, não é necessário nenhum tipo de intervenção (ICRP 1993).

Os resultados considerados de concentração de radônio foram obtidos a partir do ensaio com detector passivo CR-39. Os resultados obtidos do detector ativo AlphaGuard não foram considerados devido ao nível de erro apresentado.

Com base na análise de todos os resultados encontrados, conclui-se que para que o fosfogesso seja amplamente utilizado na construção civil, este deve ser utilizado como adição à um aglomerante, pois seu ganho próprio de resistência não é suficiente. Composições otimizadas devem ser estudadas para que a aplicação do fosfogesso respeite as normas já estabelecidas para os aglomerantes que receberão a adição.

Com os resultados encontrados também pode-se concluir que a substituição de 5% do aglomerante, no caso o gesso natural, por fosfogesso é segura para a saúde das pessoas, pois está dentro dos valores aceitáveis determinados pela ICRP para que não haja necessidade de intervenção.

## 5.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para trabalhos futuros, sugere-se estudar aspectos importantes para a caracterização e aplicação na construção civil do resíduo fosfogesso que não foram contemplados neste trabalho. Como sugestão propõe-se:

- Avaliar os tempos de início e fim de pega de pastas com diferentes teores de fosfogesso e gesso;
- Produzir pastas compostas de 5% fosfogesso e 95% gesso com relação água/gesso inferior à sugerida pelo fabricante, ou seja, inferior à 0,75 e obter a relação água/gesso para a qual a pasta atinja resistência à compressão superior ao mínimo estabelecido por norma;

- Avaliar o comportamento dos cimentos produzidos com adição de fosfogesso, principalmente com relação à oxidação das armaduras, tempos de início e final de pega, porosidade e resistências à compressão e à tração;
- Avaliar maneiras de se efetuar o descarte de peças com fosfogesso em sua composição, após reformas ou demolições;
- Avaliar o risco de lixar revestimentos de pastas com fosfogesso em sua composição, devido ao pó que pode ser inalado; e
- Avaliar a concentração de radônio advinda de pastas com diferentes teores de fosfogesso.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 28-10**: Standard Specification for Gypsum Plaster. West Conshohocken, 2010a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 842-05**: Standard Specification for Application of Interior Gypsum Plaster. West Conshohocken, 2010b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico para a utilização do cimento Portland**. 7.ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 43**: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12128**: Gesso para construção: determinação das propriedades físicas da pasta. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: Gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 1991b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994.

AQUINO, P. E. A produção de ácido fosfórico e a geração de fosfogesso, In: **Desafios Tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso**. Anais eletrônicos. Belo Horizonte. UFMG, 2005. Disponível em: <<http://www.fosfogesso.eng.ufmg>>. Acesso em: 7 de fevereiro de 2014.

ATSDR - Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Radon Toxicity. **Case Studies in Environmental Medicine**. Atlanta: 2000.

BECKER, P. **Phosphate and phosphoric acid: raw materials, technology and economics of the wet process**. Fert. Sci. Technol. Ser., 2. ed. vol. 6, Nova Iorque: Marcel Decker Inc., 1989.

BERISH, C. W. Potencial environmental hazards of phosphogypsum storage in central Florida. In: Third International Symposium on Phosphogypsum. **Proceedings...** Orlando, Florida: FIPR pub n.01-060-083, v.2, p.1-29, 1990.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 1992-1-1:2004**: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules for buildings. Londres, 2004.

CANUT, Mariana M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CHANG, W. F.; MANTELL, M. I. **Engineering properties and construction applications of phosphogypsum**. University of Miami. Phosphate Research Institute. Miami: University of Miami Press, 1990.

CNEN – **Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <[www.cnem.gov.br](http://www.cnem.gov.br)>. Acesso em: Fevereiro de 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 307 de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2014.

COSTA, Lucas J. P. da. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências**. 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CUNHA, A. C. Q. da; HELENE, P. R. L. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica, 2001.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Perfil Analítico dos Fertilizantes Fosfatados**. Boletim n.39. 1976.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Sumário Mineral 2009**. Fosfato. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Sumário Mineral 2011**. Fosfato. 2011.

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

FREITAS, J. B. A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. In: **Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, Uberaba: IBRAFOS, p. 325-339, 1992.

FOSFÉRTIL. **Avaliação da qualidade química do gesso fornecido pela Fosfertil com relação aos parâmetros: índice de acidez e teores de  $P_2O_5$ .** 2005. 12 p.

ICRP 60 - International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, Oxford: Pergamon Press, 1993.

INB – Indústrias Nucleares Brasileiras. **Radiações**. Disponível em: <[http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao\\_id=79](http://www.inb.gov.br/pt-br/WebForms/interna2.aspx?secao_id=79)>. Acesso em: fevereiro de 2014.

JACOMINO, V. M. F. **Fosfogesso**. Belo Horizonte: CDTN/CNEN, 2003. 17 p. Relatório Técnico Científico por Missão. 2003.

LUZ, C. A. da; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C.; AMBROISE, J.; PERA, J. Estudo de um cimento com baixo impacto ambiental (BIA) a partir do clínquer sulfoaluminoso e do fosfogesso. **Ambient. Constr.**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 7-27, out/dez, 2005.

MARIA, Ligia E.; SILVA, Paulo P. **Processo Para Construção de Ambientes-Teste de Detecção de Concentração de Radônio**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Tecnologia em Mecânica - Modalidade Gestão da Manufatura. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MAZZILLI, B; SAUEIA, C. H. R. Implicações Radiológicas da Utilização de Fosfogesso como Material de Construção. **Ambient. Constr.**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 17-22, jul/dez, 1997.

MAZZILLI, B.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C. H. R.; NISTI, M. B. Radiochemical Characterization of Brazilian Phosphogypsum. **Elsevier: Journal of Environmental Radioactivity**, n. 49, p. 113-122, 2000.

NUERNBERG, N. J.; RECH, T. D.; BASSO, C. Uso do gesso agrícola. **Boletim Técnico**. Empresa de Pesquisas Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A (EPAGRI). Santa Catarina, n. 112, 2005.

PAES, V. P. **Caracterização radioquímica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  e dos isótopos de urânio e tório no fosfogesso**. 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PEREIRA, Raquel R. **Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico de cimento Portland**. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química e Bioquímica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

PINTO, Thiago C. de S. **Aplicação de técnicas clássicas para polpas não floculadas de dimensionamento de espessadores aplicadas a suspensões de salmoura e lodo biológico**. 2007. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PORSTENDÖRFER, J. Properties and Behaviour of Radon and Thoron and Their Decay Products in the Air. **Tutorial Sessions of Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment**. Commission of the European Communities: Luxemburgo, 1993.

RABI, J.A.; SILVA, N.C.da. **Radon exalation from phosphogypsum building boards: symmetry constraints, impermeable boundary conditions and umerical simulation of a test case**. Elsevier: Journal of Environmetnal Radioactivy, p.1 -12, 2005.

RIO DOCE, A.P.C. **Determinação da Taxa de Exalação de  $^{222}\text{Rn}$  em Materiais de Construção**. Rio de Janeiro: COPPE, 1997. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

ROSA, R. **Exposição potencial a radiação natural, no interior de residências, devido ao uso do fosfogesso na indústria da construção civil**. 1997. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

RUFO, R. C. **Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

RUOSTEENOJA, E. **Indoor radon and risk of lung cancer: an epidemiological study in Finland**. 1991. Academic dissertation. Medical Faculty of the University of Tampere, Helsinki, 1991.

RUTHERFORD, P. M.; DUDAS, M. J.; SAMEK, R. A. Environmental impacts of phosphogypsum. **Science of the Total Environment**, v.149, p.1-38, jun. 1994.

SAUEIA, C. H.; MAZZILLI, B. P.; FAVARO, D. I. T. Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizer in Brazil, **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v.264, p.445-448, 2005.

SEMINÁRIO SOBRE RADÔNIO NO BRASIL, 2., 2014, Poços de Caldas. **Proceedings...** Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica, 2014.

SILVA, N. C. **Radionuclídeos naturais e elementos tóxicos em pilhas de fosfogesso no Brasil: caracterização e lixiviação**. 2001. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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

TOGINHO FILHO, D. O.; ANDRELLO, A.C. **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral**. Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2009.

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

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

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Potencial uses of phosphogypsum and associated risks**. Washington DC, 1992.

VALE FERTILIZANTES. **Apresentação da Empresa**. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com>>. Acesso em: 16 fev. 2014.

VILLAVERDE, Freddy L. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso**. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.