

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

ALINE CRISTINA BATISTA
FERNANDA SATIKO NAKAMURA

**VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
PROPORÇÕES DE GESSO E FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE
CONSTRUÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

ALINE CRISTINA BATISTA
FERNANDA SATIKO NAKAMURA

**VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES
PROPORÇÕES DE GESSO E FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE
CONSTRUÇÃO**

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

Orientadora: Prof^a Dra. Janine Nicolosi Corrêa

Co-orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer

CURITIBA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE GESSO E FOSFOGESSO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

Por

ALINE CRISTINA BATISTA
FERNANDA SATIKO NAKAMURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no primeiro semestre de 2018, pela seguinte banca de avaliação:

Profa. Orientadora – Janine Nicolosi Corrêa, Dra.
UTFPR

Prof. Co-Orientador – Wellington Mazer, Dr.
UTFPR

Prof. Arthur Medeiros, Dr.
UTFPR

Prof. Sergei Anatolyevich Paschuk, Dr.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Aos nossos pais, pelo amor, força e apoio para superarmos todos os desafios. Sua dedicação, seus conselhos e ensinamentos foram fundamentais para nossa formação. Obrigada pelo exemplo profissional e de vida que vocês são.

Aos nossos irmãos, avós e tios, pelo incentivo, cuidado, conversas, cumplicidade, conselhos, alegrias e carinho. O apoio da família foi essencial para nós.

À Prof^a Janine Nicolosi Corrêa, pela orientação, paciência, disponibilidade e amizade. Muito obrigada por ser uma ótima professora, coordenadora e orientadora. Sua postura e modo de ser sempre será um exemplo para seguirmos.

Ao Prof^o Wellington Mazer, pela co-orientação e pelos ensinamentos passados ao decorrer do curso.

Ao Felipe Perretto e à Isabelle, pela ajuda no desenvolvimento prático do trabalho. O auxílio ofertado no laboratório foi de extrema importância para nós.

À Bela e à Mila, pelo suporte, amor incondicional e pelo conforto de sua companhia.

À Isabela Reichardt, à Maria Paula Cavarsan, ao Sergio Leandro e ao Fernando Graunke, por todo o apoio, pelos momentos de consolo, alegria e descontração, tornando estes cinco anos os melhores possíveis. Esperamos levar essa amizade para sempre.

À todos nossos amigos, por estarem presentes em todos os momentos, compartilhando nossas alegrias.

E à todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Saber não é o suficiente – devemos aplicar.

Querer não é o suficiente – devemos fazer.

Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832)

RESUMO

BATISTA, Aline Cristina; NAKAMURA, Fernanda Satiko. Viabilidade técnica da utilização de diferentes proporções de gesso e fosfogesso como material de construção. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

O fosfogesso, resíduo radioativo da indústria de fertilizantes, além de ser produzido entre 4 a 6 vezes mais do que o ácido fosfórico, não apresenta destinação adequada, sendo geralmente empilhado em grandes áreas. O aproveitamento deste resíduo na construção civil em substituição total ou parcial ao gesso beneficiaria tanto a indústria de fertilizantes quanto a indústria da construção civil, diminuindo a exploração de gipsita, recurso natural. O presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica de diferentes proporções de gesso e fosfogesso para utilização na construção civil. Para isto, foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e radiológica com misturas de gesso comercial e fosfogesso, sendo os resultados analisados de acordo com normas brasileiras, normas internacionais e com estudos realizados anteriormente. A partir da caracterização física e mecânica foi possível concluir que a utilização do fosfogesso é inviável, uma vez que, além de não apresentar uma padronização definida, o material não satisfaz requisitos de norma, à exceção da massa unitária. Para massa unitária, foi estabelecido que proporções contendo até 21,5% de fosfogesso atenderiam o limite de norma. A resistência à compressão atingiu valores máximos de $5,4 \pm 0,4$ MPa em misturas contendo fosfogesso. No ensaio de dureza, o resultado máximo atingido foi de $8,7 \pm 0,7$ N/mm². A caracterização pode ter sido influenciada pela possível baixa qualidade do gesso, que mesmo puro não atingiu os valores requeridos. Na análise radiológica, os valores encontrados foram inferiores aos limites estabelecidos por normas. A concentração de radônio máxima dentre as proporções foi de 147 ± 26 Bq/m³, enquanto a atividade de rádio equivalente máxima foi de $5,7 \pm 1,7$ Bq/kg, ambas para um cômodo padrão, possibilitando a aplicação deste sem gerar problemas de saúde para a população.

Palavras-chave: Fosfogesso. Gesso. Resíduo. Caracterização. Viabilidade técnica. Material de construção.

ABSTRACT

BATISTA, Aline Cristina; NAKAMURA, Fernanda Satiko. The study of the technical feasibility of different proportions of gypsum and phosphogypsum as a construction material. 66f. Course Completion Work – Civil Engineering, Civil Construction Department, Federal Technological University of Paraná. Paraná, Curitiba, 2018.

The phosphogypsum, a radioactive residue derived from the fertilizer industry, in addition to being produced 4 to 6 times more than phosphoric acid, doesn't have an appropriate disposal, usually being stacked in vast areas. Utilizing this residue as a total or partial substitute for gypsum as a building material would benefit both the fertilizer industry and the construction industry, reducing the exploitation of gypsum, a natural resource. This study aims to analyse the technical feasibility of using different proportions of gypsum and phosphogypsum in the construction industry. To accomplish this objective, physical, mechanical and radiological tests have been conducted, and its results analysed according to national and international norms as well as previous studies. Based on the physical and mechanical characterization it can be concluded that using phosphogypsum is impracticable, seeing that the material neither presents a defined trend line nor meets the minimum required in national standards. The only exception being the dry unit weight, where it was established that proportions containing up to 21,5 percent of phosphogypsum would attend the minimum required. The materials compression strength reached peak points of $5,4 \pm 0,4$ MPa when mixed in any proportion to phosphogypsum. The hardness test reached maximum of $8,7 \pm 0,7$ N/mm². The characterisation may have been influenced by the gypsum's possible low quality, since it didn't meet the requirements even on its own. The radiological analysis found results inferior to the limits established by national and international organs. Maximum radon concentration indoor was found to be 147 ± 26 Bq/m³, while for maximum equivalent radium activity indoor was $5,7 \pm 1,7$ Bq/kg, allowing its use without any health concerts to the general population.

Keywords: Phosphogypsum. Gypsum. Residue. Characterization. Technical feasibility. Construction material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre condutividade e densidade do gesso.....	16
Figura 2 - Esquema de processo produtivo do ácido fosfórico.....	22
Figura 3 - Potenciais fontes de contaminação aos humanos	24
Figura 4 - Fluxo detalhado do processo de produção de ácido fosfórico	26
Figura 5 - Moldagem dos corpos de prova	35
Figura 6 - Aparelho para definição da massa unitária	36
Figura 7 - Ensaio de dureza	37
Figura 8 - Ensaio da exalação de Rn	39
Figura 9 - Esquema de montagem experimental para medida da taxa de exalação de Rn.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre massa unitária e % de fosfogesso presente na mistura ...	44
Gráfico 2 - Relação entre resistência à compressão e % de fosfogesso presente na mistura.....	46
Gráfico 3 - Relação entre dureza e % de fosfogesso presente na mistura.....	48
Gráfico 4 - Relação entre dureza e % de fosfogesso presente na mistura – 2º ensaio	50
Gráfico 5 - Relação da atividade de Ra_{eq} x concentração de ^{222}Rn em corpos de prova de concreto e argamassa de cimento.....	53
Gráfico 6 - Relação entre concentração de Ra_{eq} e % de fosfogesso presente na mistura.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil – ABNT 2017	21
Tabela 2 - Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil – ABNT 1994	21
Tabela 3 - Percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura em função da concentração máxima de Ra no fosfogesso.....	31
Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova x ensaios	35
Tabela 5 - Massa unitária de proporções do tipo A	43
Tabela 6 - Massa unitária de proporções do tipo B	43
Tabela 7 - Massa unitária de proporções do tipo C	43
Tabela 8 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo A	45
Tabela 9 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo B	45
Tabela 10 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo C	46
Tabela 11 - Dureza de proporções do tipo A.....	47
Tabela 12 - Dureza de proporções do tipo B.....	48
Tabela 13 - Dureza de proporções do tipo C.....	48
Tabela 14 - Dureza de proporções do tipo A - 2º ensaio.....	49
Tabela 15 - Dureza de proporções do tipo B - 2º ensaio.....	49
Tabela 16 - Dureza de proporções do tipo C - 2º ensaio.....	49
Tabela 17 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo A.....	51
Tabela 18 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo B.....	51
Tabela 19 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo C	51
Tabela 20 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo A em cômodo padrão ...	52
Tabela 21 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo B em cômodo padrão ...	52
Tabela 22 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo C em cômodo padrão ...	52
Tabela 23 - Atividade de Ra_{eq} de proporções do tipo A	54
Tabela 24 - Atividade de Ra_{eq} de proporções do tipo B	54
Tabela 25 - Atividade de Ra_{eq} de proporções do tipo C	54
Tabela 26 - Resultados da atividade de Ra_{eq} de demais autores.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL.....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 GESSO NATURAL.....	14
2.1.1 Propriedades físicas e mecânicas.....	16
2.1.2 Aplicações do gesso.....	20
2.1.3 Normatização	21
2.2 FOSFOGESSO	22
2.2.1 Descarte	23
2.2.2 Impactos ambientais.....	24
2.2.3 Radioatividade.....	25
2.2.4 Aplicações do fosfogesso	28
2.2.5 Normatização	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 Gesso	33
3.1.2 Fosfogesso	33
3.2 MÉTODOS	33
3.2.1 Preparação dos corpos de prova.....	34
3.2.2 Ensaio de massa unitária	36
3.2.3 Ensaio de dureza.....	37
3.2.4 Ensaio de resistência à compressão	38
3.2.5 Ensaio da exalação de ^{222}Rn	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 MASSA UNITÁRIA	43
4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	45
4.3 DUREZA.....	47
4.4 EXALAÇÃO DE ^{222}Rn	50
5 CONCLUSÕES	57
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.2 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A destinação correta dos resíduos sólidos é uma das maiores preocupações das indústrias, devido à crescente conscientização em relação aos impactos causados por estes no meio ambiente. Resíduos descartados inadequadamente podem gerar inúmeros problemas, como a contaminação do ar, solo, rios ou lençóis freáticos. Uma das formas mais atraentes de reduzir estes impactos é através do reaproveitamento dos resíduos, pois além de gerar materiais de baixo custo, o reaproveitamento também reduz o consumo de recursos naturais.

Na indústria de fertilizantes fosfatados, a produção de ácido fosfórico através da reação de rocha fosfática com ácido sulfúrico gera como subproduto o fosfogesso (também conhecido como gesso químico), um resíduo sólido. Estima-se que 130 milhões de toneladas de fosfogesso são produzidas anualmente no mundo, sendo reaproveitado através de aplicações na agricultura, em estabilizações químicas e em pavimentações (RUFO, 2009). Porém, por ser um material com limitações de uso, acaba sendo utilizado em quantidades extremamente inferiores àquelas produzidas.

Uma das potenciais possibilidades de uso do fosfogesso está na construção civil. Sabe-se que esta indústria é uma das maiores consumidoras de recursos naturais, portanto, observa-se a vantagem da utilização do fosfogesso como substituto de matérias-primas. Este reaproveitamento seria vantajoso tanto para a construção civil quanto para a indústria de fertilizantes, pois atualmente o fosfogesso raramente possui uma destinação apropriada, necessitando de grandes locais para seu armazenamento. Além disso, é um recurso abundante e que, devido ao fato de conter radionuclídeos em sua composição, ao ser estocado pode contaminar as pessoas que o manuseiam e o ambiente ao seu redor.

O fosfogesso apresenta composição química muito semelhante à do gesso, recurso natural muito explorado pela construção civil. Parece viável, portanto, a utilização do fosfogesso em substituição ao gesso natural, mas devido à falta de padronização, seu uso pode acarretar alguns problemas. Ambos são compostos predominantemente de sulfato de cálcio, porém a composição do fosfogesso muda conforme o processo pelo qual este é produzido. A presença de impurezas em sua estrutura também cria dificuldades para sua utilização, devido à alteração de suas propriedades físicas e químicas.

Atualmente, não há normas que regem a qualidade e as propriedades físicas mais comuns necessárias para a utilização deste recurso. É necessário, portanto, o estudo de suas características físicas e químicas de modo a verificar o atendimento destas às normas referentes à utilização do gesso na construção civil e às normas nacionais e internacionais referentes à radiação.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é estudar a viabilidade técnica da utilização de diferentes proporções de gesso e fosfogesso na indústria da construção civil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos a serem atingidos são os seguintes:

- Estabelecer uma faixa de proporções entre gesso e fosfogesso;
- Determinar a concentração de radionuclídeos Rn (radônio) e Ra (rádio) nas amostras de gesso+fosfogesso através de análises diretas e indiretas, respectivamente;
- Caracterizar o fosfogesso por meio de ensaios das propriedades físicas e mecânicas;
- Comparar os resultados de caracterização obtidos com as normas pré-existentes de gesso e de radiação.

1.3 JUSTIFICATIVA

A indústria de fertilizantes fosfatados é de vital importância para a agricultura mundial. A alta geração de resíduos provenientes desta indústria é inevitável, já que a produção de duas toneladas de ácido fosfórico gera como rejeito cinco toneladas de fosfogesso (SAUEIA, 1998). Portanto, sua reutilização acarreta em benefícios tanto para as indústrias quanto para o meio ambiente, minimizando seu impacto.

Ademais, do ponto de vista econômico, além do fosfogesso ser um material de custo mais baixo em relação ao gesso, seus depósitos são mais próximos dos grandes centros consumidores do que as reservas de gipsita, tornando o frete mais barato e impactando no preço final do produto, tornando viável economicamente seu uso como insumo (CANUT, 2006).

Tendo em vista que o fosfogesso é um material de baixo custo e gerado em grandes proporções, seu uso na indústria em substituição ao gesso é de grande importância. Para isso, se faz necessária a análise das propriedades físicas e mecânicas para atestar sua viabilidade.

O estudo também se justifica pelo fato do resíduo conter radionuclídeos da série de decaimento natural do urânio (U) e do tório (Th). A presença desses componentes torna imprescindível a análise radiológica em termos da concentração de radônio e rádio, uma vez que normatizações nacionais e internacionais limitam este elemento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O uso do fosfogesso em substituição parcial ou total ao gesso natural é de importância tanto econômica-social quanto ambiental, devido à grande geração deste tipo de resíduo e a falta de destinação apropriada (CANUT, 2006).

O estudo e contextualização de ambos os materiais, gesso e fosfogesso, é imprescindível para a compreensão e desenvolvimento deste trabalho.

2.1 GESSO NATURAL

A gipsita é um mineral abundante na natureza composto de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Este mineral pode ser utilizado na forma natural ou calcinada, sendo esta última conhecida comercialmente como gesso. Em sua forma natural é utilizado prioritariamente na indústria cimenteira e na agricultura, já em sua forma calcinada possui grande aproveitamento na construção civil, para fins ortopédicos e ortodônticos, entre outros (BALTAR *et al.*, 2005).

O processo de produção do gesso consiste basicamente em três etapas: extração da matéria-prima (gipsita), moagem e calcinação. Caso necessário pode ocorrer uma quebra dos minerais de gipsita antes da moagem.

No Brasil, a extração da matéria-prima gipsita ocorre em bacias sedimentares localizadas nas regiões Norte e Nordeste, sendo o estado de Pernambuco responsável por 95% do abastecimento do mercado nacional. A gipsita possui uma composição estequiométrica média de 32,5% de óxido de cálcio (CaO), 46,6% de trióxido de enxofre (SO_3) e 20,9% de água (H_2O) (MUNHOZ e RENÓFIO, 2006).

Após a extração, a gipsita é submetida ao processo de moagem, realizado através de britadores de mandíbula e moinhos de martelo. O produto resultante desta etapa deve possuir distribuição granulométrica uniforme. Esta característica possibilita uma desidratação por igual das partículas de gipsita na etapa de calcinação (BALTAR *et al.*, 2004).

Na calcinação, processo térmico pelo qual a gipsita é desidratada, o material é exposto à temperaturas entre 140 °C e 160 °C, permitindo uma desidratação parcial que dá origem a um sulfato de cálcio hemi-hidratado, também conhecido como hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) (BARBOSA *et al.*, 2014). A calcinação é necessária para

obtenção de um gesso com propriedades apropriadas para uso específico, sendo assim chamado de beneficiamento térmico da gipsita (CANUT, 2006).

De acordo com o processo de calcinação realizado podem ser obtidas duas variedades de hemidrato: gesso alfa e gesso beta. O gesso alfa, produto mais nobre e com preços mais elevados, é obtido pelo processo de autoclavagem, através do uso de equipamento fechado e sob pressão maior que a atmosférica. O gesso beta é obtido em diferentes tipos de fornos que realizam o processo de aquecimento térmico sob pressão atmosférica (SOBRINHO *et al.*, 2001).

O gesso alfa, de maior resistência mecânica, é utilizado em bandagens de alta resistência, matrizes para indústria cerâmica, indústria de modelagem (usados por artistas plásticos), ortopedia, odontologia e indústria automobilística. O gesso beta, de menor qualidade, é utilizado na indústria da construção civil, indústria cerâmica e indústria de modelagem (BALTAR *et al.*, 2004).

Se houver necessidade, ao fim da produção é realizada a mistura com aditivos para modificar propriedades específicas do produto, como tempo de pega, por exemplo (BALTAR *et al.*, 2005).

Inicialmente a gipsita foi utilizada com propósitos artísticos e decorativos por civilizações antigas, como a egípcia e a romana. Seu uso na construção civil, como gesso, se propagou a partir do século XVIII na Europa, sendo utilizado também como corretivo de solos (BALTAR *et al.*, 2005; OLIVEIRA *et al.*, 2012). A partir de 1885, o gesso passou a ser mais difundido na construção civil, pela descoberta de que sua adição ao clínquer retarda o tempo de pega (SOBRINHO *et al.*, 2001; BALTAR *et al.*, 2005).

A utilização do gesso como material de construção vem crescendo gradativamente ao longo dos anos devido à sua praticidade e ao seu baixo custo. Inicialmente utilizado como material de revestimento e material de fundição, teve maior crescimento desde meados dos anos 1990, a partir da utilização do sistema *drywall* em vedações internas (CAVALCANTE e MIRANDA, 2011; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DRYWALL, 2012).

2.1.1 Propriedades físicas e mecânicas

A gipsita é um mineral que apresenta baixa dureza, baixa resistência à compressão, altamente solúvel e que, sob ação do calor, desidrata-se formando o gesso (SOBRINHO *et al.*, 2001).

De acordo com Canut (2006), o gesso é um pó branco de elevada finura e propriedades intrínsecas que viabilizam a sua utilização como material de construção, como isolamento térmico, resistência ao fogo, isolamento acústico, aderência, trabalhabilidade e resistência mecânica.

Devido à essas propriedades aliadas a uma alta durabilidade, facilidade na montagem e baixo custo, o gesso vem sendo amplamente utilizado na construção civil (CAVALCANTE e MIRANDA, 2011).

As propriedades aqui citadas serão discutidas nos tópicos a seguir.

2.1.1.1 Isolamento e condutividade térmica

Isolamento térmico é o processo pelo qual o material dificulta a dissipação de calor de um ambiente, corpo ou objeto. O gesso é um material de potencial isolamento térmico, que, de acordo com Karni e Karni (1995), é uma consequência direta de sua estrutura porosa. A condutividade térmica do gesso, propriedade intrínseca do material que afeta diretamente o isolamento, varia com sua densidade, como mostra o trabalho de Westphal *et al.* (2017) apresentado na Figura 1.

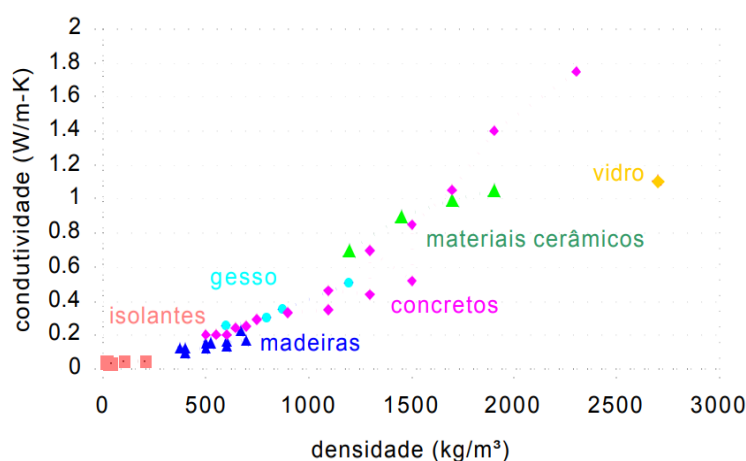


Figura 1 - Relação entre condutividade e densidade do gesso
Fonte: WESTPHAL *et al.*, 2017

O uso de placas de gesso finas não gera uma redução significativa da condutividade térmica da parede, sendo necessário utilizar estes materiais dispostos em camadas duplas com espaço de ar entre as placas para atingir um bom isolamento. A adição de materiais isolantes entre as placas ou a utilização de placas especiais são formas de melhorar ainda mais o isolamento (KARNI e KARNI, 1995).

Observa-se que para a maioria dos materiais a condutividade aumenta com o aumento da densidade, sendo o gesso um melhor isolante do que grande parte dos concretos, materiais cerâmicos e vidro.

2.1.1.2 Resistência ao fogo

O gesso é um material não inflamável e que apresenta alta resistência ao fogo. Segundo Karni e Karni (1995), sua resistência provém de sua composição química, especialmente da proporção de água existente dentro de seus cristais. Quando o gesso entra em contato com fogo, começam a ocorrer reações químicas no material, liberando a água existente em sua composição e consumindo parte do calor do ambiente, ajudando a conter o aumento excessivo de temperatura. Este processo é conhecido como calcificação.

Os autores ainda afirmam que a calcificação do gesso é um processo demorado devido à proteção que a camada externa de gesso, já calcificada, provém as camadas mais internas. Esta proteção evita que, até a completa calcificação do gesso, os materiais adjacentes a este atinjam altas temperaturas, retardando a ação do fogo no local. A eficiência da resistência ao fogo está, naturalmente, relacionada a espessura da camada de gesso.

2.1.1.3 Isolamento acústico

Duas propriedades intrínsecas dos materiais, de grande importância para a construção civil, são o isolamento acústico e a capacidade de absorção sonora. O isolamento acústico representa a capacidade que um elemento tem de reduzir a transferência de som através de si. A capacidade de absorção sonora do material representa a perda de energia do som ao entrar em contato com a sua superfície.

Segundo Karni e Karni (1995), tais propriedades não apresentam alto desempenho por si só no gesso, devido à sua baixa densidade aparente e ao fato de sua superfície ser lisa, porém, estas podem ser facilmente melhoradas com a adição de aditivos à sua composição. Para potencializar seu uso, podem ser utilizados retardadores de pega, retentores de água ou plastificantes, por exemplo (NOGUEIRA, 2012).

2.1.1.4 Aderência

A aderência ao substrato é uma das principais propriedades exigidas ao gesso enquanto material de construção civil. Santos (2008) estudou a aderência como sendo a resistência ao arrancamento da argamassa endurecida do substrato e afirma que sofre interferência de diversas maneiras, como pela condição superficial do substrato, pela qualidade e dosagem correta dos materiais, pela capacidade de retenção de água, pela espessura do revestimento, entre outros.

Embora seu estudo seja de grande importância, o ensaio de aderência não foi realizado devido ao fato do equipamento necessário estar em manutenção durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

2.1.1.5 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é uma propriedade de extrema importância para o gesso, pois caso não atinja nível satisfatório torna impraticável o uso do gesso como material de construção.

Kruger *et al.* (2013) definem a trabalhabilidade como a facilidade em manusear, transportar e aplicar uma argamassa ou concreto. Este conceito aplica-se também a pasta de gesso.

Segundo Costa (2013), esta propriedade é influenciada por diversos fatores, como por exemplo a presença ou não de aditivos que podem agir acelerando ou retardando o processo. O principal dentre estes fatores é a relação água/gesso, onde percebe-se uma relação diretamente proporcional à trabalhabilidade, ou seja, quanto maior a quantidade de água adicionada, maior a facilidade de moldagem.

A temperatura e o tamanho das partículas também interferem na trabalhabilidade do material. A relação entre o tempo de trabalhabilidade e o aumento da temperatura apresenta-se em dois trechos. O trecho é crescente até a temperatura de 50° C, sendo esta considerada o valor ótimo. Após este ponto, o aumento da temperatura mostra-se prejudicial ao tempo de trabalhabilidade (ANTUNES, 1999 *apud* COSTA, 2013). Já o tamanho da partícula se relaciona à área superficial específica do material, inversamente proporcional ao tempo de processo (SOARES, 2005).

2.1.1.6 Resistência mecânica

A resistência mecânica é uma propriedade do material verificada através de ensaios de resistências à compressão, tração, flexão e dureza. É um parâmetro dos esforços a que um material pode ser submetido sem que sofra ruptura (CINCOTTO *et al.*, 1988 *apud* SAVI, 2012).

Savi (2012) define a resistência à compressão de um material como “a capacidade que um determinado corpo tem para resistir aos esforços de compressão axial”. Diversos autores definem limites para os valores médios de resistência, porém estes divergem entre si. O valor mínimo necessário para a resistência à compressão da pasta de gesso é definido por norma e está apresentado no tópico 2.1.3.

Outro critério para análise da resistência mecânica, a resistência à flexão representa a resistência a esforços transversais que um corpo possui, porém este parâmetro para gesso não é definido por norma.

2.1.1.7 Dureza

Por definição, a dureza é uma propriedade física dos materiais, que representa a resistência de um material a uma deformação localizada, como o risco, por exemplo, sendo diretamente proporcional à resistência mecânica e à resistência ao desgaste do material. Segundo Albuquerque *et al.* (2008), a dureza de um material representa a resistência que este apresenta à penetração de um objeto ou ao risco que o objeto pode causar em sua superfície.

Seu valor pode ser utilizado para estimar a resistência ao desgaste, assim como fornecer informações sobre ductilidade, tratamento térmico, entre outros (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008). A dureza também qualifica o material quanto à resistência, trabalhabilidade e durabilidade (SAVI, 2012).

No geral, existem três tipos de ensaios de dureza, sendo estes a dureza por riscamento, dureza por choque e dureza por penetração. O critério de escolha depende do material a ser estudado, por exemplo, para metais, o mais adequado é o ensaio de penetração. O ensaio mais interessante para o estudo de minerais é o de riscamento (DIETER, 1986).

Para a construção civil, a NBR 13207 (ABNT, 2017c) estabelece um valor limite mínimo para o ensaio de dureza a ser apresentado no tópico 2.1.3.

2.1.2 Aplicações do gesso

A gipsita em sua forma natural apresenta uma variada gama de aplicações. Na indústria química, é utilizada para obtenção de diversos produtos, como ácido sulfúrico, sulfato de amônio, entre outros. Na agricultura, seu uso principal se dá como fertilizante e na correção de solos alcalinos, reagindo com o carbonato de sódio. Na construção civil, é utilizado como *filler* na construção de estradas asfaltadas (BALTAR *et al.*, 2005). Na indústria cimenteira o gesso é adicionado ao clínquer para regular o tempo de pega, retardando seu endurecimento (LIMA, 2011).

O gesso, embora utilizado em diversas indústrias, apresenta uma maior aplicação na construção civil. Sua alta resistência ao fogo o torna de grande valia no isolamento térmico de portas corta fogo, assim como a realização de isolamento acústico, em misturas de gesso com materiais porosos (BALTAR *et al.*, 2005).

O uso do gesso mais comum na construção civil é no revestimento e acabamento de paredes em substituição ao reboco e argamassas, podendo também servir como rebaixamento de tetos. O gesso também é utilizado em grande escala para a confecção de pré-moldados, como por exemplo placas de gesso acartonado (COSTA, 2013).

2.1.3 Normatização

De acordo com Costa (2013), o gesso brasileiro é um material que apresenta diferentes propriedades e características, devido à fatores como o método de extração utilizado e a jazida de onde este provém. Sua normatização para utilização como material na construção civil não é de acordo com a classificação do material, mas sim de acordo com os resultados de testes relativos à certas propriedades, descritas anteriormente.

A norma referente à utilização do gesso na construção civil é a NBR 13207 (ABNT, 2017c). Esta norma define, entre outros parâmetros, os limites mínimos para os ensaios de massa unitária, dureza e aderência, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil – ABNT 2017

ENSAIOS	UNIDADE	LIMITE
Massa unitária	g/cm ³	≥ 600
Dureza	N/mm ²	≥ 20
Aderência	MPa	≥ 0,2

Fonte: ABNT, 2017c

Esta norma, além de não estabelecer limite para a resistência à compressão do gesso, especifica um valor incoerente com a realidade para o limite de massa unitária (600 g/cm³), erro proveniente da utilização inadequada de unidades, na troca de kg/m³ para g/cm³. É necessária a consulta à NBR 13207 (ABNT, 1994) para definição destes parâmetros, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Requisitos físicos e mecânicos do gesso para construção civil – ABNT 1994

DETERMINAÇÕES FÍSICAS E MECÂNICAS	UNIDADE	LIMITES
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	> 8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	> 30
Massa unitária (NBR 12127)	Kg/m ³	> 700

Fonte: ABNT, 1994

Os ensaios realizados para a determinação das propriedades citadas devem ser realizados de acordo com as NBR 12127 (ABNT, 2017a) e NBR 12129 (ABNT, 2017b).

As normas em vigência específicas para gesso não especificam o procedimento de ensaio em laboratório para aderência, sendo normalmente utilizada a NBR 13528 (ABNT, 2010) como referência.

2.2 FOSFOGESSO

O fosfogesso é um resíduo proveniente da produção de ácido fosfórico que, segundo Pereira (2010), é um item essencial na produção de fertilizantes fosfatados. De acordo com Saueia (1998), “os fertilizantes são produzidos e usados para aumentar e repor os nutrientes naturais do solo que são perdidos pelo desgaste da erosão”, por isso vêm se tornando cada vez mais importante no mercado agrícola mundial. O esquema simplificado do processo produtivo do ácido fosfórico está representado na Figura 2.

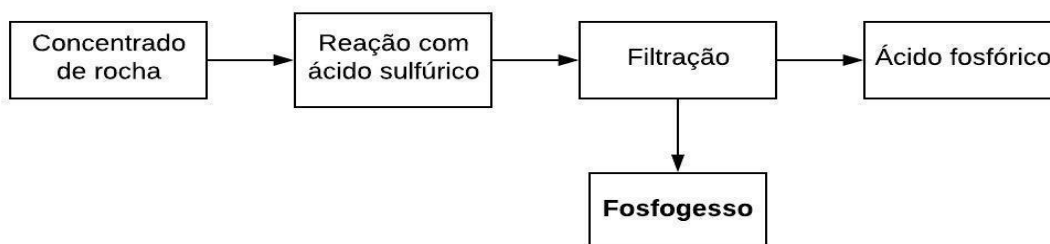


Figura 2 - Esquema de processo produtivo do ácido fosfórico
Fonte: Adaptado de PEREIRA, 2010

O fosfogesso, também conhecido como gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético, é gerado entre 4 a 6 vezes mais do que o ácido fosfórico em si, causando um problema para as empresas de fertilizantes (CANUT, 2006).

A composição estequiométrica do fosfogesso apresenta em média 44% de trióxido de enxofre (SO_3), 32,5% de óxido de cálcio (CaO), entre outros elementos em menores teores (KOULOHERIS, 1980 *apud* MATOS, 2011). A composição do fosfogesso pode variar de acordo com a natureza da rocha fosfática e do processo pelo qual é produzido, o que influencia em suas características químicas e mineralógicas (BOURLEGAT, 2010).

O fosfogesso contém altas taxas de impureza, incluindo diversos metais pesados e altas concentrações de elementos da série do U, como o ^{226}Ra e o ^{222}Rn . Tal composição tanto impede seu uso como material quanto faz de sua estocagem perigosa para o meio ambiente (BERISH, 1990; MAZZILLI *et al.*, 1999).

Assim como o gesso, para uso na construção civil o fosfogesso deve passar por um processo de beneficiamento térmico. O beneficiamento consiste na desidratação do fosfogesso em temperatura suficiente para que ocorra a formação do sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), assemelhando-o em sua composição com o gesso (SCHADECK, 2017).

2.2.1 Descarte

Da produção mundial de fosfogesso, apenas 15% é reciclada ou reutilizada como corretor de solo e material de construção. Os 85% restantes são descartados sem tratamento sobre o solo (TAYIBI *et al.*, 2009).

O descarte pode ocorrer de três maneiras, sendo estas pelo retorno à mina de extração de rocha fosfática, pelo empilhamento do material em locais específicos e pelo descarregamento em corpos de água, como rios. O critério de escolha depende de variáveis como o custo, a localização da unidade geradora, a legislação local, a disponibilidade de grandes áreas, entre outros. Com a crescente preocupação ambiental, tem se tornado cada vez menos usual o descarregamento do resíduo em rios e oceanos (SILVA e GIULIETTI, 2010).

Segundo Silva e Giulietti (2010), o retorno à mina de extração apresenta um baixo impacto ambiental, porém apenas é economicamente viável se esta for próxima à indústria de produção de ácido fosfórico. A forma mais comum de descarte, portanto, é pelo empilhamento no solo e pode ocorrer de duas formas, pela via úmida ou pela via seca.

A via seca consiste no transporte de fosfogesso diretamente da filtração, apresentando aproximadamente 30% de umidade, através de caminhões ou correias transportadoras. A via úmida, com cerca de 80% de umidade, consiste na decantação da pasta de fosfogesso com água ácida residual da filtração e posterior transporte para áreas de acumulação.

2.2.2 Impactos ambientais

Os principais problemas causados no meio ambiente pelo acúmulo e armazenagem de fosfogesso provém da erosão e da liberação de substâncias nocivas, podendo estas serem transportadas para locais vizinhos (TAYIBI *et al.*, 2009). Também é preocupante a liberação do gás radônio, a inalação de poeira radioativa, a exposição direta aos raios gama, a instabilidade das pilhas e a possibilidade de esgotamento de áreas para estocagem do material (RUTHERFORD *et al.*, 1994; BERISH, 1990). As principais fontes de contaminação aos humanos e meio ambientes estão representadas na Figura 3.

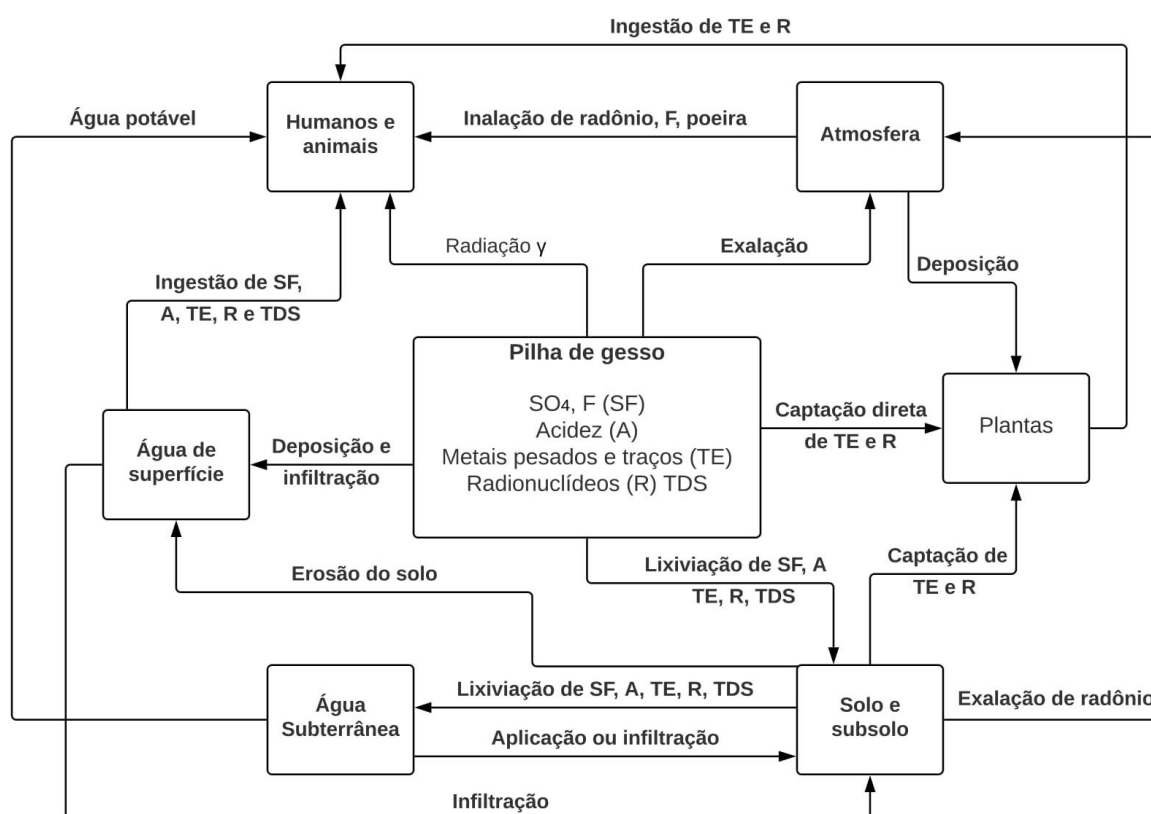


Figura 3 - Potenciais fontes de contaminação aos humanos
 Fonte: Adaptado de RUTHERFORD *et al.*, 1994

Para evitar a contaminação do solo e de águas subterrâneas pelo fosfogesso, o local de armazenagem é parcialmente protegido com uma camada de argila impermeabilizante. Porém, com o passar do tempo, notou-se que esta camada não era suficiente para evitar a contaminação total do lençol freático através das águas ácidas com altos teores de fluoretos, sulfatos e fosfatos (VALE FERTILIZANTES, 2008 *apud* ARAÚJO e FERNANDES, 2013).

Esta água ácida, produto do processo de filtragem e lavagem do fosfogesso, em parte retorna ao processo de produção e em parte percola o leito do fosfogesso (SILVA e GIULIETTI, 2010). Para minimizar este impacto nas águas subterrâneas, podem ser utilizados solos com pH básicos, reduzindo a mobilidade de metais pesados ou a construção de poços e valas interceptoras (RUTHERFORD *et al.*, 1994).

As pilhas de fosfogesso apresentam metais pesados e radionuclídeos, assim como uma alta acidez, que podem contaminar o ambiente e os organismos vivos de diversas formas. Para os seres humanos e animais, a contaminação pode ocorrer de forma direta, pela radiação gama, ou indireta, como por exemplo pela ingestão de metais pesados e radionuclídeos de uma planta contaminada.

2.2.3 Radioatividade

A rocha fosfática, componente do processo de geração do fosfogesso, possui naturalmente uma concentração considerável de U, Th e radionuclídeos de suas séries de decaimento, todos em equilíbrio radioativo, ou seja, as atividades dos produtos de decaimento passam a ser iguais àquela do isótopo de origem, independentemente de sua meia vida (HANSON e LAIRD, 1990).

Durante o processamento da rocha fosfática por via úmida, ocorre um fracionamento químico entre os diferentes membros da série de decaimento e o equilíbrio é rompido. Enquanto o U, Th e Pb (chumbo) se incorporam predominantemente ao ácido fosfórico, o Ra e o Po (polônio) se associam ao fosfogesso (BERISH, 1990; HANSON e LAIRD, 1990; RUTHERFORD *et al.*, 1994; CANUT, 2006). Esta separação pode ser observada detalhadamente na Figura 4.

Os radionuclídeos têm como unidade de atividade o Becquerel (Bq), definida pelo Sistema Internacional (SI) na 15ª Conferência Geral de Pesos e Medidas em 1975, equivalente a uma desintegração por segundo (BIPM, 2006). A atividade específica ou concentração de atividade é definida pelo IAEA (2016) como a atividade por unidade de massa ou volume do material em que os radionuclídeos estão uniformemente distribuídos, tendo como unidade o Bq/kg (Becquerel por quilograma) ou Bq/m³ (Becquerel por metro cúbico).

O radionuclídeo ^{226}Ra é precursor do ^{222}Rn (radônio), gás radioativo cancerígeno (TAYIBI *et al.*, 2009). No solo, o ^{222}Rn emanado do grão para os interstícios é, em parte, exalado para a atmosfera.

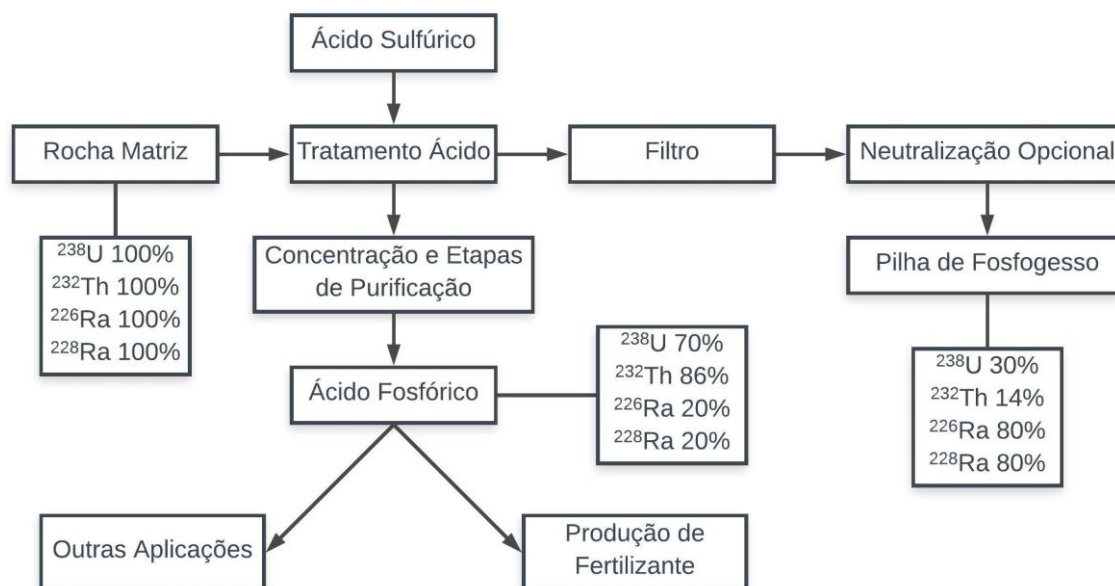


Figura 4 - Fluxo detalhado do processo de produção de ácido fosfórico
 Fonte: Adaptado de FERNANDES *et al.*, 2004

O gás radônio, juntamente com os produtos de decaimento de vida curta, é responsável pela maior parte da exposição humana à radiação de fontes naturais (RABI e SILVA, 2006). Segundo a USEPA (2017), este gás é a segunda principal causa de câncer de pulmão nos EUA, sendo a primeira entre os não-fumantes.

Os riscos causados pelo radônio justificam a preocupação quanto ao uso de fosfogesso como material de construção, sendo necessária a realização da avaliação de radioatividade do material e o atendimento deste às normas vigentes.

2.2.3.1 Radônio

O gás radônio é um gás radioativo e quimicamente inerte, originado da cadeia de decaimento radioativo do urânio e do rádio (NRC, 1999). Sua concentração no ar varia de acordo com a localidade e com a quantidade de urânio presente no solo, mas é geralmente maior em ambientes internos e fechados (*indoor*) dependendo da taxa de entrada do gás e da taxa de ventilação no local, principalmente (NERO *et al.*, 1990).

O radônio consiste predominantemente de dois isótopos naturais, provenientes de duas séries de desintegração distintas (urânio e tório). O ^{222}Rn apresenta meia vida de 3,82 dias e é derivado da série do urânio. O ^{220}Rn , torônio, têm meia vida de 55 s e faz parte da série do tório (UNSCEAR, 2006).

Por apresentar estabilidade superior, o isótopo ^{222}Rn é comumente aferido nas medidas de gás radônio (CORREIA, 2006). O gás decai através da emissão de partículas alfa (núcleos de hélio), gerando como subprodutos os radioisótopos ^{218}Po e o ^{214}Po . Os malefícios do gás radônio são provenientes principalmente de seus produtos de decaimento. As partículas alfa, advindas do gás radônio inalado, são depositadas no tecido pulmonar podendo ter como consequência a formação de tumores no pulmão (NRC, 1999).

Há diversos estudos que estipulam os perigos da exposição à altas concentrações de radônio (como por exemplo em minas), porém não há muito conhecimento sobre os efeitos da exposição constante à concentrações menores do gás, portanto o risco à saúde que este apresenta ainda não está devidamente delimitado (NRC, 1988).

A quantidade de radônio emanado da pilha de fosfogesso depende de diversas variáveis, como a área da pilha, concentração de ^{226}Ra e ^{222}Rn no fosfogesso, umidade, nível de atividade, condições climáticas, entre outros. A taxa de emissão varia em cada pilha e entre pilhas, de acordo com o espaço e com o tempo (BERISH, 1990).

2.2.3.2 Rádio equivalente

De acordo com a Beretka e Matthew (1985 *apud* Estoková e Palascakova, 2013), a concentração de radionuclídeos ^{40}K , ^{226}Ra e ^{232}Th não se apresenta de maneira uniforme. Para analisar os efeitos e o perigo referente à exposição aos materiais de construção contendo estes radionuclídeos, foi estabelecido um índice denominado rádio equivalente (R_{eq}). O índice é definido de acordo com a Equação (1).

$$R_{\text{eq}} = A(^{226}\text{Ra}) + 1,43 A(^{232}\text{Th}) + 0,077 A(^{40}\text{K}) \quad (1)$$

Onde $A(^{226}\text{Ra})$, $A(^{232}\text{Th})$ e $A(^{40}\text{K})$ representam as concentrações de ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K respectivamente, em Bq/kg. A atividade equivalente de rádio é calculada a partir da estimativa que 370 Bq/kg de ^{226}Ra , 259 Bq/kg de ^{232}Th e 4810 Bq/kg de ^{40}K produzem a mesma dose referente à irradiação gama (ISSA *et al.*, 2012).

2.2.3.3 Difusão

O transporte do gás ^{222}Rn nos poros de materiais de construção até alcançarem a superfície depende de dois fenômenos, a difusão e a convecção. O coeficiente de difusão refere-se à facilidade de deslocamento do gás por entre os poros e a convecção é a movimentação do gás induzida por variações de pressão devido às condições meteorológicas (PORSTENDÖRFER, 1993). A transferência do ^{222}Rn do espaço poroso para atmosfera é, mais especificamente, conhecida como exalação (MACACINI, 2008).

A exalação de radônio está relacionada, dentre outras, com o tamanho das partículas. Harb *et al.* (2016) observaram que com a redução do tamanho dos grânulos do mineral, a taxa de exalação tendia a aumentar, de modo geral. Os resultados encontrados indicaram que os materiais com fosfato apresentam uma maior taxa de exalação que outros materiais de construção.

2.2.4 Aplicações do fosfogesso

Visando a redução do volume de fosfogesso estocado, estudos têm sido realizados para testar a viabilidade de sua utilização como material nos mais diversos ramos.

O fosfogesso pode ser utilizado como substituto à gipsita, devido à semelhança entre suas propriedades físicas e químicas. Seu maior aproveitamento ocorre na produção de cimento e na agricultura, porém já vem sendo utilizado em menor escala na pavimentação e na fabricação de pré-moldados (CANUT, 2006).

2.2.4.1. Agricultura

Na agricultura, o fosfogesso apresenta diversos usos, podendo contribuir como fonte de nutrientes, especialmente cálcio e enxofre, ou para modificar certas propriedades do solo. Suas características o permitem atuar na correção de camadas superficiais com teores indesejados de alumínio e cálcio, na correção de solos sódicos e de modo a reduzir perdas de nitrogênio no processo de compostagem (DIAS, 1992).

Após ser aplicado no solo, o fosfogesso apresenta grande mobilidade, fixando-se abaixo da camada arável, favorecendo assim o aprofundamento das raízes e a absorção de nutrientes pelas plantas ali dispostas (SOUSA *et al.*, 1995).

Apesar dos diversos benefícios que o fosfogesso aplicado na agricultura proporciona, este pode ser uma fonte potencial de radioatividade gerando problemas ambientais, através da assimilação de radionuclídeos e outros elementos pelas plantas, acúmulo radioativo no solo e contaminação de águas superficiais e subterrâneas (RUFO, 2009). Devido à estes problemas, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), através da resolução nº 147, estabelece o nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira como sendo de 1000 Bq/kg para concentração de atividade de ^{226}Ra ou de ^{228}Ra para cada radionuclídeo (CNEN, 2013).

2.2.4.2 Indústria cimenteira

A indústria cimenteira é uma das maiores consumidoras de gipsita. Utilizada como retardadora de pega, a gipsita é adicionada ao cimento Portland na etapa de moagem do clínquer, constituindo entre 2 a 5% em massa do cimento. Diversos países, como o Japão, já substituem o uso de gesso pelo fosfogesso, devido à carência de jazidas minerais de gipsita (CANUT, 2006).

As impurezas presentes no fosfogesso como metais pesados, fluoretos e nuclídeos radioativos obrigam a realização de um tratamento de purificação, para que este possa ser adicionado ao cimento. Este tratamento consiste na retirada da maior parte de suas impurezas, especificamente as que afetam seu desempenho ou o meio ambiente (OLIVEIRA, 2005).

Alguns parâmetros devem ser respeitados para a aplicação do fosfogesso na indústria cimenteira, como por exemplo o índice de acidez deve ser superior a 4 e o teor de ácido fosfórico menor que 0,8%. Caso o pH seja baixo, este pode contribuir com a despassivação de armaduras em estruturas de concreto, assim como reduzir sua resistência inicial (CANUT, 2006).

2.2.4.3 Construção civil

Na construção civil, o fosfogesso é utilizado em substituição ao gesso natural na fabricação de placas, blocos e painéis, na produção de gesso e na fabricação de agregados de concreto (OLIVEIRA, 2005; CANUT, 2006). Em maior escala, é possível considerar o uso do fosfogesso para pavimentação de ruas e estradas, onde os materiais são utilizados em grandes quantidades. Testado pela primeira vez em 1980, na Flórida, para ruas com tráfego leve, descobriu-se que o fosfogesso, quando misturado com solo não-coesivo, forma uma base estável para pavimentos betuminosos (FOLEK *et al.*, 2011).

Segundo Folek *et al.* (2011), foram realizados experimentos na Finlândia onde utilizaram misturas de fosfogesso, cinza volante e cal na pavimentação, não apresentando mudanças drásticas em suas propriedades após dois anos de utilização.

Esta mistura também pode ser utilizada na realização de blocos, substituindo blocos de argila tradicionais. Quando realizados com alta proporção de cinza volante, os blocos apresentam resistência suficiente para utilização em habitações de baixo custo (KUMAR e KUMAR, 2003).

2.2.5 Normatização

O fosfogesso, composto principalmente por sulfato de cálcio di-hidratado e impurezas, é um material de qualidade dependente da qualidade da rocha fosfática e da via de processo utilizada na produção do ácido fosfórico (SAADAoui *et al.*, 2017). Esta divergência entre as características de materiais gerados em diferentes locais e

por diferentes processos dificulta sua normatização, não existindo normas brasileiras que regulam as propriedades físicas do fosfogesso.

A falta de normatização aliada à similaridade entre as propriedades da gipsita e do fosfogesso possibilita a utilização da NBR 13207 (ABNT, 2017c) e NBR 13207 (ABNT, 1994) para definição dos limites das propriedades físicas e mecânicas do fosfogesso como material de construção. Os limites definidos pelas normas foram apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Para comparação das propriedades radiológicas, foram utilizadas normas internacionais ou resoluções da CNEN. A resolução CNEN n° 189 estabelece as percentagens limites, em massa, de fosfogesso na mistura com gesso (gipsita não radioativa) em função das concentrações máximas de ^{226}Ra e ^{228}Ra presentes no fosfogesso (CNEN, 2015). Estes dados estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 - Percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura em função da concentração máxima de Ra no fosfogesso

Concentração Máxima de Ra-226 no Fosfogesso (Bq/kg)	Concentração Máxima de Ra-228 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: CNEN, 2015

Este trabalho priorizou a documentação da CNEN como referência, devido ao fato de seus documentos serem elaborados a partir de estudos do fosfogesso brasileiro, mais próximo do objeto de estudo real.

Para se identificar a concentração máxima de ^{226}Ra no fosfogesso, em Bq/kg, em geral são necessários ensaios complexos e de elevado custo de espectrometria gama. Todavia, a partir de medições de Rn e de um modelo de exalação apropriado,

pode-se inferir a concentração de Ra no material pela quantidade de Rn exalado. Cabe ao fornecedor a especificação da quantidade de Ra que o material apresenta.

Dentre as normas nacionais e internacionais, existem discordâncias devido ao fato de não ser conhecido um valor máximo de concentração que garanta não oferecer risco, de curto ou longo prazo, àqueles a que forem expostos. Segundo recomendação da Organização Mundial da Saúde (OMS), cada país deve definir um limite de referência para a concentração de radônio em ambiente interno, devendo este ser tão baixo quanto razoavelmente possível (WHO, 2009).

A OMS recomenda, com base em dados científicos sobre os efeitos na saúde da exposição ao radônio, um valor limite de 100 Bq/m³. É importante notar que diversos estudos sugerem que há uma associação estatisticamente significativa entre o aumento do risco de câncer de pulmão e a concentração de radônio, mesmo quando esta se apresenta abaixo de 200 Bq/m³ (WHO, 2009).

Nos países cujas condições específicas não permitirem este nível de referência, o *International Commission on Radiological Protection* (ICRP), em sua publicação nº 126 propõe adotar o valor limite de 300 Bq/m³ para o radônio *indoor*. Tal valor corresponde a uma dose anual considerada como alta, porém dentro dos limites estabelecidos (ICRP, 2014).

No Brasil, a CNEN recomenda através da Posição Regulatória 3.01/007 um limite máximo de 10 mSv/ano para doses, o que corresponde a aproximadamente 300 Bq/m³ para concentração *indoor* (CNEN, 2005).

Para ambientes com níveis de concentração de radônio acima de 300 Bq/m³, é recomendável investigar mais profundamente as causas e tomar as medidas de remediação necessárias (WHO, 2009).

Para o Ra_{eq} existem menos estudos sobre os limites de doses e concentrações, sendo definido pela UNSCEAR (2000) que a concentração não pode ultrapassar 370 Bq/kg.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de trabalho, apresentada a seguir, foi elaborada com o propósito de determinar propriedades de interesse de diferentes proporções de gesso e fosfogesso, possibilitando uma comparação com normas pré-existentes de gesso e propriedades radiológicas, visando seu uso como material de construção civil.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios foram disponibilizados pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

3.1.1 Gesso

O gesso utilizado para a realização deste trabalho encontrava-se estocado em local seco e coberto, disposto em sacos plásticos vedados.

3.1.2 Fosfogesso

Para a realização do presente trabalho foram utilizados três tipos de fosfogesso proveniente de duas indústrias distintas de Cajati - SP, possibilitando a verificação da variação de propriedades entre amostras preparadas com diferentes tipos de fosfogesso. O primeiro tipo (A) foi doado pela empresa A, o segundo tipo (B), doado pela empresa B e o terceiro tipo (C) também doado pela empresa B. Os materiais se encontravam armazenados em sacos plásticos vedados em ambiente coberto.

3.2 MÉTODOS

Para o presente trabalho, os corpos de provas foram preparados de acordo com o que estabelecem as normas em vigência para realização dos ensaios de massa

unitária (ABNT, 2017a), resistência à compressão (ABNT, 2017b) e dureza (ABNT, 2017b). Para a realização do ensaio de concentração de ^{222}Rn , foram consultadas referências sobre o assunto, incluindo resoluções da CNEN, relatórios da UNSCEAR e USEPA.

Inicialmente, os materiais necessários foram separados e transportados para o laboratório de materiais. Os métodos utilizados para a preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios são apresentados a seguir.

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

Para a preparação dos corpos de prova, primeiramente peneirou-se o gesso e o fosfogesso utilizados para fabricação das amostras em peneira com abertura de 1,2 mm, para separação dos torrões e impurezas.

O gesso e fosfogesso foram colocados em estufa por 24h na temperatura controlada de 150 °C com o objetivo de secagem e calcinação. A temperatura de 150 °C foi definida com base no estudo de Schadeck (2017), que determina ser esta a temperatura de beneficiamento para obtenção do hemidrato a partir do sulfato de cálcio di-hidratado presente no fosfogesso. Estes foram os únicos tratamentos prévios dado aos materiais.

Os corpos de provas foram produzidos nas seguintes proporções de gesso:fosfogesso: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 e 0:100, para cada um dos três tipos diferentes de fosfogesso. As proporções foram definidas de modo a envolver uma gama considerável de dados, com o objetivo de obter uma linha de tendência que possa prever o comportamento da mistura em qualquer proporção. As misturas de diferentes proporções foram preparadas no dia de utilização, com os materiais ainda em estado pulverulento.

Esta mistura em pó foi utilizada diretamente na realização do ensaio de massa unitária, enquanto para os demais ensaios foi necessária a produção de uma pasta de gesso, fosfogesso e água. A quantidade total de corpos de prova que foram preparados de cada proporção está apresentada na Tabela 4.

A relação água/gesso+fosfogesso utilizada na preparação da pasta foi a relação água/gesso indicada pelo fabricante no pacote de gesso. A relação é de 1 kg de água para 1,2 kg de gesso. Foi produzido volume de pasta suficiente para

confeção de seis moldes cúbicos de 50 x 50 x 50 mm, utilizados nos ensaios de resistência à compressão, dureza e concentração de Rn.

Tabela 4 - Quantidade de corpos de prova x ensaios

QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA				
TIPO	PROPORÇÃO (G/F)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	DUREZA/ EXALAÇÃO DE Rn	TOTAL
A	75:25	3	3	6
	50:50	3	3	6
	25:75	3	3	6
	0:100	3	3	6
B	75:25	3	3	6
	50:50	3	3	6
	25:75	3	3	6
	0:100	3	3	6
C	75:25	3	3	6
	50:50	3	3	6
	25:75	3	3	6
	0:100	3	3	6
GESSO	100:0	3	3	6
TOTAL	-	39	39	78

Fonte: Autoria própria

A pasta foi preparada polvilhando o gesso+fosfogesso sobre a água durante 1 min e misturando até obter uma pasta homogênea. Transferiu-se a pasta imediatamente para seis moldes cúbicos previamente untados com cera desmoldante, sendo os corpos de prova retirados do molde após 24 horas. A moldagem de corpos de prova está apresentada na Figura 5.

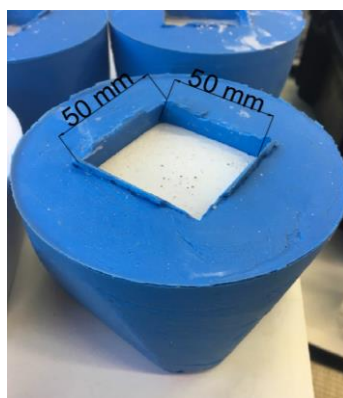


Figura 5 - Moldagem dos corpos de prova
Fonte: Autoria própria

Nas misturas que possuíam uma proporção maior de fosfogesso pode-se perceber que a pasta, além de apresentar uma menor trabalhabilidade, endurecia em menos de um minuto, dificultando sua moldagem em alguns casos. Os corpos de prova foram então identificados e colocados na estufa em baixa temperatura para secagem até atingir a constância de massa, sendo então realizados os ensaios de compressão e dureza.

3.2.2 Ensaio de massa unitária

Para a determinação da massa unitária, utilizou-se um aparelho tal qual o apresentado na Figura 6, consistindo de um funil cônico, um tripé, uma peneira e um recipiente de medida, sendo representados respectivamente como A, B, C e D.

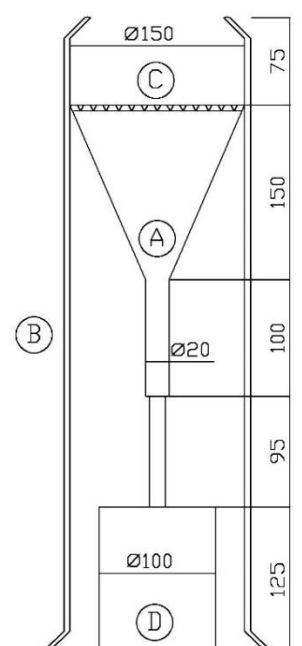


Figura 6 - Aparelho para definição da massa unitária
Fonte: Adaptado de ABNT, 2017a

Inicialmente, tarou-se a balança com o recipiente de medida devidamente limpo e vazio sobre esta. Colocou-se, então, o funil sobre o recipiente, de tal modo que estes ficassem centralizados verticalmente. Em seguida, foram adicionadas 100 g da mistura ao funil, até a passagem completa do material. Repetiu-se este procedimento até que a mistura transbordasse no recipiente de medida. A superfície do recipiente foi rasada, retirando o excesso de material com o cuidado de não compactá-lo e pesou-se o conjunto.

Utilizando a Equação (2), onde μ é a massa unitária em g/cm^3 , m é a massa do material em gramas e V é o volume do recipiente em cm^3 , foi possível obter a massa unitária do material em questão.

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Em conformidade com a NBR 12127 (ABNT, 2017a), foi considerado o valor médio de três determinações, desde que a diferença entre estes dois valores tenha sido menor que 5%. Caso contrário, foi necessário repetir o ensaio tomando uma nova quantidade da mesma amostra.

3.2.3 Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza, atingida a constância de massa, posicionou-se o corpo de prova em uma prensa de ensaio que permitiu a aplicação de uma carga fixa de (500 ± 5) N através de placas padronizadas, centralizado à aplicação de carga. Na parte central da superfície voltada para cima, dispôs-se uma esfera de aço duro de diâmetro $(10,0 \pm 0,5)$ mm, sendo respeitada uma distância mínima de 20 mm das bordas, evitando falhas ou bolhas no corpo de prova. Na Figura 7 está apresentada a execução do ensaio de dureza.

Inicialmente, aplicou-se uma carga de 50 N, aumentando-a, em 2 s, para 500 N e mantendo-a desta forma durante 15 s. Passado este tempo, retirou-se a carga e mediu-se a profundidade (t) impressa no corpo de prova com ajuda de um paquímetro.



Figura 7 - Ensaio de dureza
Fonte: Autoria própria

A dureza (D), em N/mm², foi dada pela Equação (3), onde F é carga em N, ϕ é o diâmetro da esfera em mm e t é a profundidade em mm.

$$D = \frac{F}{\pi \cdot \phi \cdot t} \quad (3)$$

Conforme a NBR 12129 (ABNT, 2017b), calculou-se a dureza para cada corpo de prova, sendo que o valor desta não deveria diferir mais de 15% da média total. Caso a diferença tenha ultrapassado 15%, o resultado do corpo de prova mais distante da média foi descartado e uma nova média calculada. Se após este descarte os valores individuais continuaram diferindo em 15% da média, um novo ensaio foi realizado.

3.2.4 Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, posicionou-se o corpo de prova centralizado à aplicação de carga em uma prensa de ensaio com capacidade de carga superior a 2000 N, exatidão mínima de 200 N, placas de aplicação de carga de área mínima de 2500 mm² e curso mínimo de 100 mm. Então, aplicou-se a carga continuamente em uma razão de 250 N/s a 750 N/s até a ruptura.

Encontrou-se o valor da resistência à compressão (R), em MPa, pela Equação (4), onde P é o valor da carga aplicada ao corpo de prova, em N, e S é a área de seção transversal na qual foi aplicada a carga, em mm².

$$R = \frac{P}{S} \quad (4)$$

De acordo com a NBR 12129 (ABNT, 2017b), foi calculada a resistência média dos três ensaios, sendo que cada resultado individual não poderia diferir mais de 15% da média. Caso um ou mais resultados tenham ultrapassado este intervalo, o valor de resultado individual mais distante da média foi desconsiderado para os cálculos. Se após este descarte os valores individuais continuaram diferindo em 15% da média, um novo ensaio foi realizado.

3.2.5 Ensaio da exalação de ^{222}Rn

O ensaio de exalação de ^{222}Rn foi realizado através do equipamento AlphaGUARD, que mede a concentração de Rn *indoor*, em águas, solo e sistemas com circulação de ar fechado. O AlphaGUARD é um equipamento portátil, com alta sensibilidade e ótima precisão, composto por uma câmara de ionização projetada para monitorar continuamente a concentração de ^{222}Rn no intervalo entre 2 a 2.000.000 Bq/m³ (SAPHYMO, 2015).

Para a realização deste ensaio é necessário o estabelecimento de um estado de equilíbrio secular entre o ^{226}Ra e o ^{222}Rn , nuclídeo pai e nuclídeo filho, respectivamente. Este equilíbrio acontece quando as atividades de radionuclídeos pertencentes à mesma cadeia radioativa são iguais.

A metodologia do ensaio é baseada em procedimentos padrão em medições de ^{222}Rn , utilizado pelos laboratórios da CNEN e pelo Laboratório de Física Nuclear da UTFPR.

Utilizou-se três corpos de prova de cada proporção para o ensaio, sendo estes os mesmos utilizados no ensaio de dureza (não-destrutivo). Os corpos de prova foram selados e envoltos com papel filme em cinco de suas faces, sendo a última forrada com filtro de aspirador de pó, de modo a garantir que o gás fosse exalado apenas pela face superior. O filtro é utilizado para impedir que partículas de sujeira entrem no sistema de circulação de ar e cheguem à câmara de ionização do AlphaGUARD.

O aparato utilizado consistia do equipamento de monitoração AlphaGUARD, bomba de ar (*AlphaPump*), mangueiras e frascos de vidro. Na Figura 8 é mostrada a execução do ensaio.



Figura 8 - Ensaio da exalação de Rn
Fonte: Autoria própria

Prepararam-se 14 frascos de vidro de três litros, 13 deles contendo os corpos de prova de cada proporção e um apenas com a quantidade de filtro utilizado para envolver as amostras. O frasco com os filtros serve de parâmetro de *background* para medições subsequentes. Os frascos com as amostras e filtro ficaram fechados por aproximadamente 40 dias, isolados do ambiente externo, para que o estado de equilíbrio secular fosse atingido.

Realizaram-se três etapas para a medida: ventilação, medida de *background* e medida das amostras. A etapa de ventilação reduz e garante que a concentração intrínseca do equipamento seja o mais baixa possível; a etapa de *background* mede a concentração de Rn intrínseca do sistema e a etapa de medida das amostras obtém a concentração de Rn no conjunto amostra+filtro.

Na etapa de ventilação, conectou-se uma bomba de ar a uma taxa de volume de 1 L/min ao AlphaGUARD e deixou-a ligada por 40 min. A ventilação é aberta, com o objetivo de renovar o ar do sistema. Utilizou-se um filtro na entrada de ar para impedir que partículas de poeira entrem no equipamento. Nesta etapa não foi necessário que o AlphaGUARD estivesse ligado, pois é apenas uma preparação para a etapa seguinte.

Na etapa de *background*, foi separada a mesma quantidade de filtros necessária para embrulhar os corpos de prova e colocou-se em um dos frascos de vidro. Tal medida foi adotada como valor de referência do equipamento, sendo posteriormente descontada dos valores obtidos nas análises das amostras. Conectou-se os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a Figura 9.

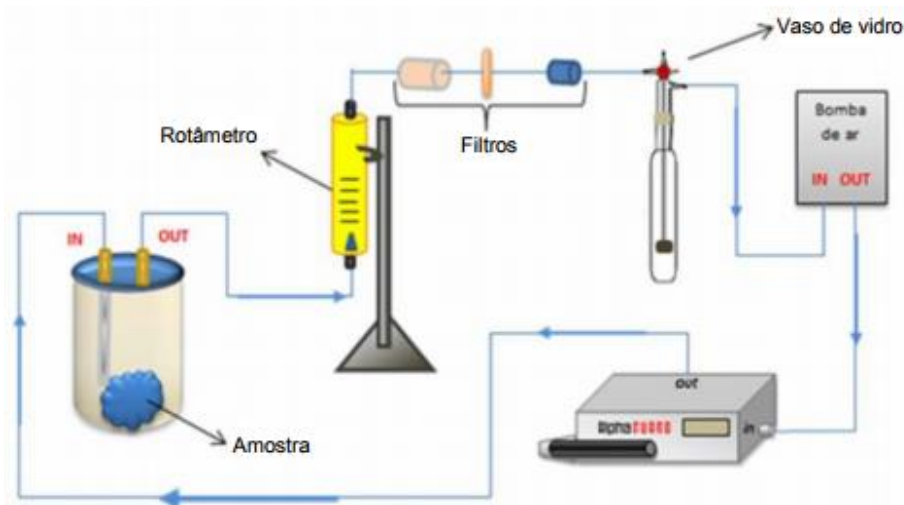


Figura 9 - Esquema de montagem experimental para medida da taxa de exalação de Rn

Fonte: DEL CLARO, 2013

Ligou-se o AlphaGUARD e anotou-se o número da corrida e hora. O equipamento deve estar configurado no modo 10 *min/flow*, ou seja, 10 medidas por minuto. Aguardou-se o tempo de espera do equipamento e ligou-se a bomba de ar a uma taxa de volume de 0,5 L/min. Após 24 horas do início da medida, desligou-se o equipamento e a bomba.

Na etapa de medida das amostras, foram conectados os frascos contendo os corpos de prova já em equilíbrio secular com os equipamentos e acessórios com as mangueiras, de acordo com a Figura 9. Foi realizada a medida de apenas um frasco por vez. Ligou-se o AlphaGUARD e anotou-se o número da corrida e hora. Assim como no *background*, o equipamento deve estar configurado no modo 10 *min/flow*. Aguardou-se o tempo de espera do equipamento e liga-se a bomba de ar a uma taxa de volume de 0,5 L/min. As medidas de fosfogesso puro dos três tipos e de gesso puro foram realizadas por um período de 12 dias. As demais medições foram realizadas por um período de 24 horas.

A concentração obtida do gás ^{222}Rn é uma medida obtida para a relação área/volume dos corpos de prova para o frasco. Caso ocorra uma alteração nesta relação, os valores de concentração do gás obtidos serão diferentes.

Com o objetivo de inferir a exalação de radônio pelo fosfogesso em um ambiente interno fechado, os resultados das medidas do AlphaGUARD foram estipulados considerando um cômodo padrão de dimensões conhecidas (5,0 m x 4,0 m x 2,8 m) revestido nas paredes e no teto pelas pastas nas proporções estudadas.

A exalação de radônio em um cômodo padrão para cada proporção foi obtida por meio da Equação (5).

$$E_c = E \times \frac{(A_c / V_c)}{(A/V)} \quad (5)$$

Na Equação (5), E_c corresponde a taxa de exalação de radônio encontrada no cômodo padrão em Bq/m^3 , E representa a taxa de exalação de radônio em Bq/m^3 , A_c e A representam as áreas do cômodo padrão e das faces de exalação dos corpos de prova, respectivamente, e V_c e V representam o volume do cômodo padrão e do frasco que continha os corpos de prova, respectivamente.

Para inferir a atividade de Ra_{eq} das amostras, foi utilizado o trabalho de Perna (2016). O autor estudou a taxa de exalação de ^{222}Rn e de ^{226}Ra de concreto e argamassa de cimento. A determinação da quantidade de ^{222}Rn exalada foi realizada

por meio do equipamento AlphaGUARD e a determinação da atividade de Ra_{eq} foi realizada junto ao CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte) por meio da espectrometria gama.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MASSA UNITÁRIA

Os resultados dos ensaios realizados de massa unitária para as proporções de fosfogesso A, B e C encontram-se respectivamente nas Tabelas 5, 6 e 7, sendo a proporção indicada no formato gesso:fosfogesso. O erro da massa unitária foi desconsiderado devido ao valor ínfimo apresentado por este.

Tabela 5 - Massa unitária de proporções do tipo A

TIPO	PROPORÇÃO	MASSA UNITÁRIA (kg/m ³)
GESSO	100:0	632
A	75:25	581
A	50:50	543
A	25:75	567
A	0:100	492

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Massa unitária de proporções do tipo B

TIPO	PROPORÇÃO	MASSA UNITÁRIA (kg/m ³)
GESSO	100:0	632
B	75:25	598
B	50:50	577
B	25:75	533
B	0:100	461

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 - Massa unitária de proporções do tipo C

TIPO	PROPORÇÃO	MASSA UNITÁRIA (kg/m ³)
GESSO	100:0	632
C	75:25	577
C	50:50	555
C	25:75	559
C	0:100	486

Fonte: Autoria própria

Os tipos de fosfogesso analisados apresentaram massa unitária relativamente menor do que a do gesso. A maior redução apresentada foi a do tipo B (27%) e a menor foi a do tipo A (22%) quando comparados fosfogesso e gesso puros. A massa

unitária das misturas apresentou uma tendência relativamente linear, diminuindo quando maior a adição de fosfogesso.

O gesso puro atingiu o valor mínimo de massa unitária de 600 kg/m³ especificado em norma pela NBR 13207 (ABNT, 2017c), se considerada a unidade da norma em kg/m³. Nenhuma das proporções contendo fosfogesso atingiu o resultado mínimo.

Os valores das proporções de fosfogesso puro, de todos os tipos, distam-se muito dos valores encontrados por Chang (1987) de 1280 kg/m³ para fosfogesso seco. Esta diferença pode ser explicada pelo processo de produção e pela origem do fosfogesso, sendo os analisados neste trabalho proveniente de São Paulo, Brasil e o de Chang proveniente de Flórida, Estados Unidos.

No Gráfico 1 é possível observar a variação da massa unitária de acordo com a proporção de fosfogesso presente no resultado médio do corpo de prova. Para análise, foi definida uma linha de tendência (indicada em vermelho) e sua respectiva equação.

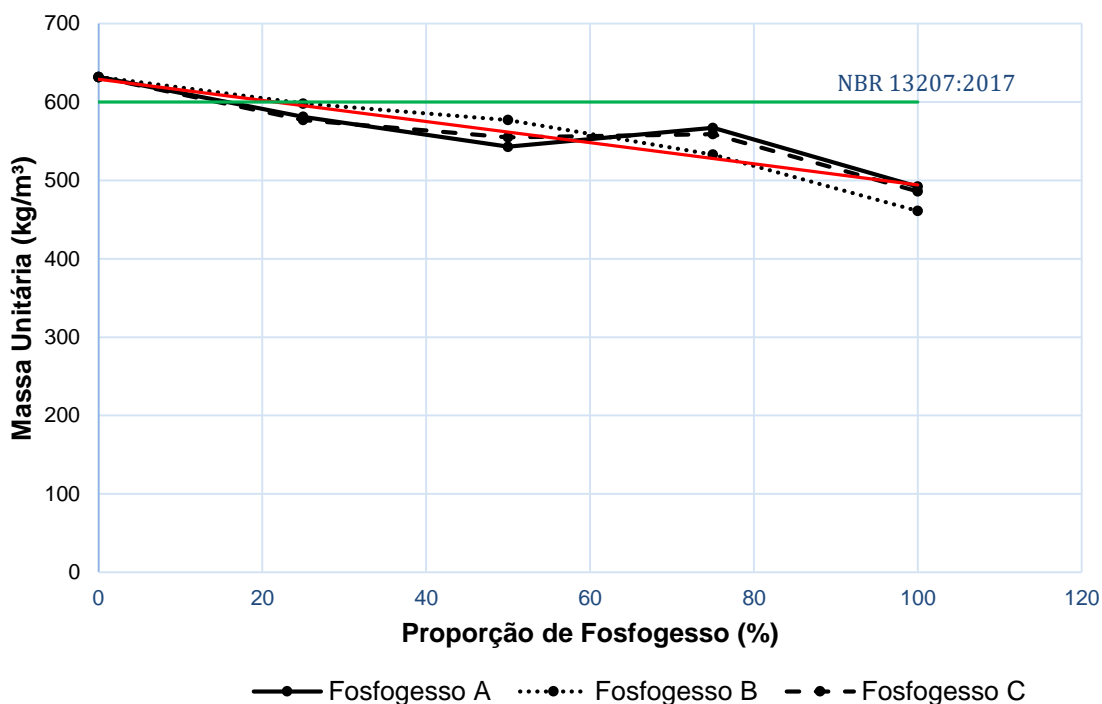


Gráfico 1 - Relação entre massa unitária e % de fosfogesso presente na mistura
Fonte: Autoria própria

A massa unitária mostrou-se ser uma propriedade padronizada entre os diferentes tipos de fosfogesso, apresentando uma variação máxima de 6,3% entre as pastas de fosfogesso puro e de 6% entre misturas (na proporção 25:75).

Através da Equação (6), obtida da linha de tendência do Gráfico 1, foi possível calcular a proporção em que a massa unitária atinge o limite mínimo de norma.

$$M_{U_{\min}} = -1,348 \times \%F + 629,07 \quad (6)$$

Considerando a massa unitária ($M_{U_{\min}}$) como 600 kg/m^3 , valor mínimo determinado pela NBR 13207 (ABNT, 2017c), foi calculado a porcentagem máxima de fosfogesso na mistura ($\%F$), chegando ao valor de 21,5%. Este valor indica que a adição de qualquer porcentagem acima de 21,5% de fosfogesso na mistura não atenderá ao requisito mínimo da norma.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de resistência à compressão, foi utilizada a relação água/gesso de 0,83 seguindo a recomendação do fabricante de gesso. Foram ensaiados três corpos de prova para cada proporção de tipo de fosfogesso e três corpos de prova para gesso. Os resultados dos ensaios estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo A

TIPO	PROPORÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	ERRO (MPa)
GESSO	100:0	8,0	0,7
A	75:25	3,7	0,3
A	50:50	1,7	0,3
A	25:75	2,7	0,6
A	0:100	2,4	0,1

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo B

TIPO	PROPORÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	ERRO (MPa)
GESSO	100:0	8,0	0,7
B	75:25	3,0	0,1
B	50:50	5,0	0,2
B	25:75	3,0	0,2
B	0:100	2,4	0,4

Fonte: Autoria própria

Tabela 10 - Resistência à compressão axial de proporções do tipo C

TIPO	PROPORÇÃO	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	ERRO (MPa)
GESSO	100:0	8,0	0,7
C	75:25	3,4	0,1
C	50:50	2,4	0,1
C	25:75	5,4	0,4
C	0:100	2,5	0,1

Fonte: Autoria própria

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial mostram a despadronização do material fosfogesso neste quesito. A maior redução apresentada quando comparados ao gesso puro foi a proporção 50:50 do tipo A, de aproximadamente 80%, e a menor foi a proporção 25:75 do tipo C (32%).

Embora tenha apresentado uma variação máxima de somente 4% na resistência de fosfogesso puro, quando misturado a resistência não apresentou uma tendência bem definida. Esta despadronização pode ser observada com maior clareza no Gráfico 2.

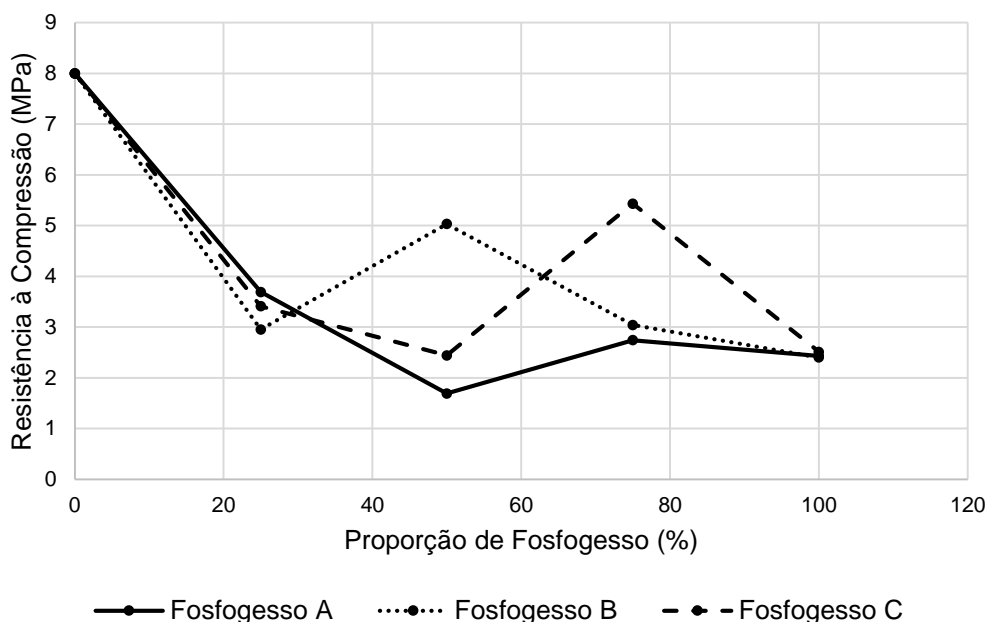


Gráfico 2 - Relação entre resistência à compressão e % de fosfogesso presente na mistura

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que, ainda que o fosfogesso B e fosfogesso C sejam provenientes do mesmo processo de produção e do mesmo local, estes apresentam resultados diferentes quando misturados com gesso.

Apesar da falta de uma tendência definida, pode-se perceber uma queda expressiva no valor da resistência dos corpos de prova a partir da adição de fosfogesso. Percebe-se também que nenhuma das proporções estudadas atingem o valor mínimo de norma (8,4 MPa), especificado pela NBR 13207 (ABNT, 1994), utilizada como referência. Embora o gesso puro apresente resistência à compressão consideravelmente superior, chegando à 8,0 MPa, este ainda não atinge a especificação da norma de 1994.

A baixa resistência encontrada do material parece estar de acordo com estudos semelhantes realizados por outros pesquisadores. Canut (2006) obteve resistência à compressão axial média de 0,97 MPa para o fosfogesso puro e 3,61 MPa para a proporção de 25% gesso/75% fosfogesso. Schadeck (2017), estudando fosfogesso beneficiado, realizou ensaios que resultaram na tensão média de somente 0,237 MPa para o material.

Faria e Ombrellino (2014) ensaiaram corpos de prova compostos de pasta de fosfogesso puro, pasta de 95% gesso/5% fosfogesso e pasta de gesso puro, misturadas à água, encontrando resistências médias de 0,343 MPa, 5,5 MPa e 8,8 MPa, respectivamente. A baixa resistência e a expressiva queda dos valores encontrados após a adição de fosfogesso corroboram os resultados deste trabalho.

4.3 DUREZA

Os corpos de prova utilizados no ensaio de dureza, assim como no ensaio de resistência à compressão, foram preparados com relação água/gesso de 0,83, seguindo recomendação do fabricante de gesso. Os resultados encontrados estão apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 - Dureza de proporções do tipo A

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESSO	100:0	1,6	0,2
A	75:25	3,1	0,6
A	50:50	3,6	0,6
A	25:75	3,3	0,3
A	0:100	1,8	0,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 - Dureza de proporções do tipo B

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESO	100:0	1,6	0,2
B	75:25	2,0	0,2
B	50:50	1,8	0,1
B	25:75	1,6	0,1
B	0:100	2,8	0,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Dureza de proporções do tipo C

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESO	100:0	1,6	0,2
C	75:25	1,8	0,1
C	50:50	1,9	0,1
C	25:75	2,1	0,1
C	0:100	1,9	0,1

Fonte: Autoria própria

Tais resultados apresentam-se distantes do mínimo ditado por norma, de 20 N/mm², além da falta de tendência do material com a adição de fosfogesso. Os resultados do ensaio estão apresentados no Gráfico 3, evidenciando a baixa dureza nos diferentes tipos de fosfogesso e a não-linearização da dureza das proporções.

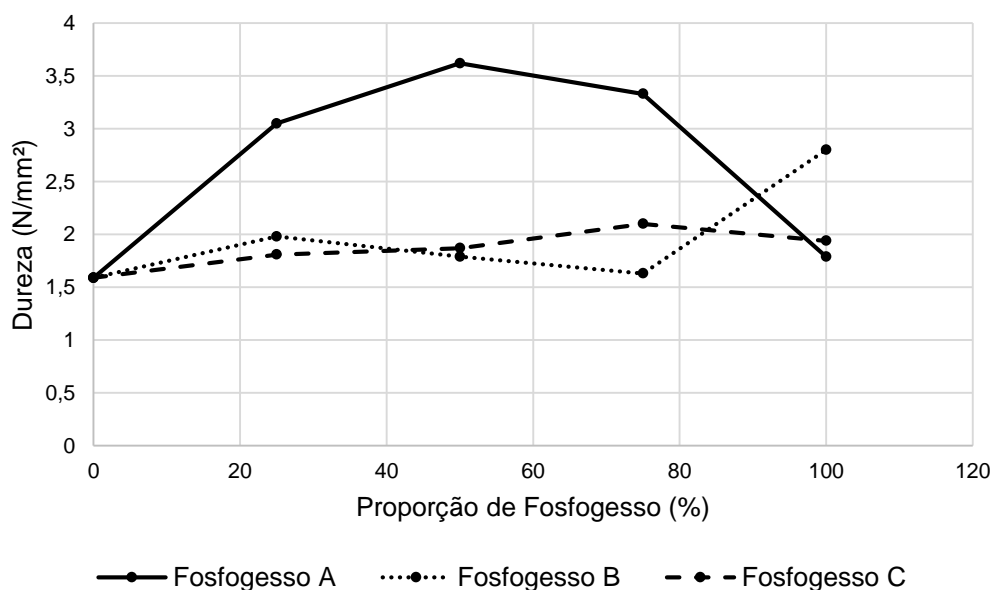


Gráfico 3 - Relação entre dureza e % de fosfogesso presente na mistura
 Fonte: Autoria própria

Os resultados encontrados, despadronizados e apresentando baixa dureza, não estão de acordo com o encontrado na literatura. Canut (2006) realizou ensaios de dureza para fosfogesso puro, proporções de 25% gesso/75% fosfogesso e 50% gesso/50% fosfogesso, encontrando resultados médios de 11 N/mm², 19 N/mm² e 27,4 N/mm² para a dureza respectivamente.

Soares *et al.* (2016) ensaiaram fosfogesso puro beneficiado a 150° C chegando ao valor de 17,24 N/mm² para a dureza, muito acima dos resultados encontrados neste trabalho.

Devido à estas divergências, três corpos de prova para cada proporção de tipo de fosfogesso foram produzidos novamente e submetidos ao ensaio de dureza. Os resultados do segundo ensaio estão apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16.

Tabela 14 - Dureza de proporções do tipo A - 2° ensaio

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESSO	100:0	8,2	0,7
A	75:25	4,2	0,1
A	50:50	2,8	0,2
A	25:75	5,1	0,7
A	0:100	6,7	0,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 15 - Dureza de proporções do tipo B - 2° ensaio

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESSO	100:0	8,2	0,7
B	75:25	3,4	0,2
B	50:50	8,7	0,7
B	25:75	1,6	0,1
B	0:100	2,8	0,5

Fonte: Autoria própria

Tabela 16 - Dureza de proporções do tipo C - 2° ensaio

TIPO	PROPORÇÃO	DUREZA (N/mm ²)	ERRO (N/mm ²)
GESSO	100:0	8,2	0,7
C	75:25	6,6	0,4
C	50:50	4,8	0,3
C	25:75	2,7	0,9
C	0:100	3,4	0,1

Fonte: Autoria própria

Observa-se que, embora os valores de dureza obtidos tenham aumentado, estes se mantiveram distantes do mínimo de 20 N/mm² estabelecido pela NBR 13207 (ABNT, 2017c). Tais resultados podem indicar a utilização de um gesso de pior qualidade, influenciando nos resultados do ensaio. Pode-se verificar no Gráfico 4 a discrepância entre os resultados de diferentes tipos de fosfogesso e a não-linearização da dureza das proporções.

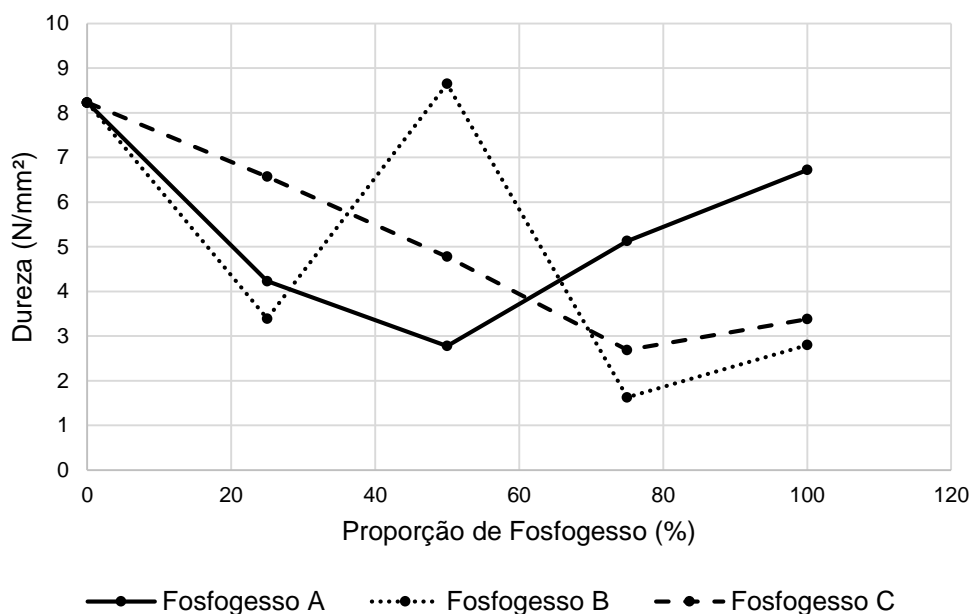


Gráfico 4 - Relação entre dureza e % de fosfogesso presente na mistura – 2º ensaio
 Fonte: Autoria própria

Percebe-se que, apesar da baixa qualidade apresentada pelo gesso, as misturas exibem alta despadronização com relação à dureza em todas as proporções e tipos de fosfogesso, atingindo variação de 58% do valor de dureza entre os tipos de fosfogesso puros e até de 68% entre proporções.

Ressalta-se ainda que, mesmo obtendo maiores valores de dureza em seus estudos, Soares *et al.* (2016) e Canut (2006) – em duas de três proporções – também não alcançaram o mínimo exigido em norma.

4.4 EXALAÇÃO DE ²²²Rn

Nas Tabelas 17, 18 e 19 estão apresentados os resultados obtidos da concentração de ²²²Rn, calculados de acordo com os dados fornecidos pelo equipamento AlphaGUARD. A quantidade de filtro utilizada em todas as medições foi

a mesma, sendo então realizada somente uma medida de *background* para melhor proveito do tempo.

Os dados obtidos pelo equipamento AlphaGUARD foram extraídos por meio do *software* DataEXPERT, que fornece os valores médios de concentração e os respectivos erros associados a cada medida (SAPHYMO, 2015).

Para a determinação do resultado final, foram calculados a média e desvio padrão do valor médio de cada medição, sendo em seguida subtraído o valor de *background*. O erro foi calculado pela raiz quadrada da soma dos quadrados do erro sistemático instrumental e do erro aleatório.

Tabela 17 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo A

TIPO	PROPORÇÃO	CONC. Rn (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	7	1
A	75:25	141	31
A	50:50	137	30
A	25:75	167	35
A	0:100	293	52

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo B

TIPO	PROPORÇÃO	CONC. Rn (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	7	1
B	75:25	21	5
B	50:50	48	14
B	25:75	89	23
B	0:100	265	49

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo C

TIPO	PROPORÇÃO	CONC. Rn (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	7	1
C	75:25	14	2
C	50:50	97	24
C	25:75	152	33
C	0:100	188	38

Fonte: Autoria própria

Para uma melhor análise de como seria a situação em um cômodo padrão, aplicou-se a Equação (5) para todos os resultados. Os dados estão apresentados nas Tabelas 20, 21 e 22.

Tabela 20 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo A em cômodo padrão

TIPO	PROPORÇÃO	Rn <i>indoor</i> (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	3	1
A	75:25	70	16
A	50:50	69	16
A	25:75	84	15
A	0:100	147	26

Fonte: Autoria própria

Tabela 21 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo B em cômodo padrão

TIPO	PROPORÇÃO	Rn <i>indoor</i> (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	3	1
B	75:25	10	3
B	50:50	24	7
B	25:75	45	12
B	0:100	133	25

Fonte: Autoria própria

Tabela 22 - Concentração de ^{222}Rn em proporções do tipo C em cômodo padrão

TIPO	PROPORÇÃO	Rn <i>indoor</i> (Bq/m ³)	ERRO (Bq/m ³)
GESSO	100:0	3	1
C	75:25	7	1
C	50:50	49	12
C	25:75	77	16
C	0:100	94	19

Fonte: Autoria própria

Os dados das tabelas permitem perceber a alta despadronização do fosfogesso. Apesar de, como esperado, a concentração de radônio crescer com a adição de fosfogesso, percebe-se que a proporção em que isso acontece dentre os diferentes tipos de fosfogesso não se mantém.

A *European Commission* (1999) estima que normalmente a concentração *indoor* proveniente de materiais de construção está entre 10 Bq/m³ a 20 Bq/m³. À exceção do gesso, apenas duas proporções dentre as 13 estudadas apresentaram resultados abaixo dos valores usuais.

Nota-se que as proporções de fosfogesso puro do tipo A e do tipo B apresentaram resultados acima do recomendado pela OMS (100 Bq/m³), porém nenhuma delas ultrapassa o valor estabelecido pela CNEN e pela ICRP (300 Bq/m³). Nenhuma das misturas não-puras apresentaram resultado acima do recomendado pela OMS. Percebe-se também uma maior semelhança entre as concentrações dos fosfogesso tipo B e C, provenientes da mesma empresa.

Com os resultados encontrados por Perna (2016), criou-se o Gráfico 5, relacionando a atividade de Ra_{eq} com os resultados de concentração de ²²²Rn. Para análise, foi estabelecida uma linha de tendência entre os três pontos definidos e sua respectiva equação, indicada em vermelho no Gráfico 5.

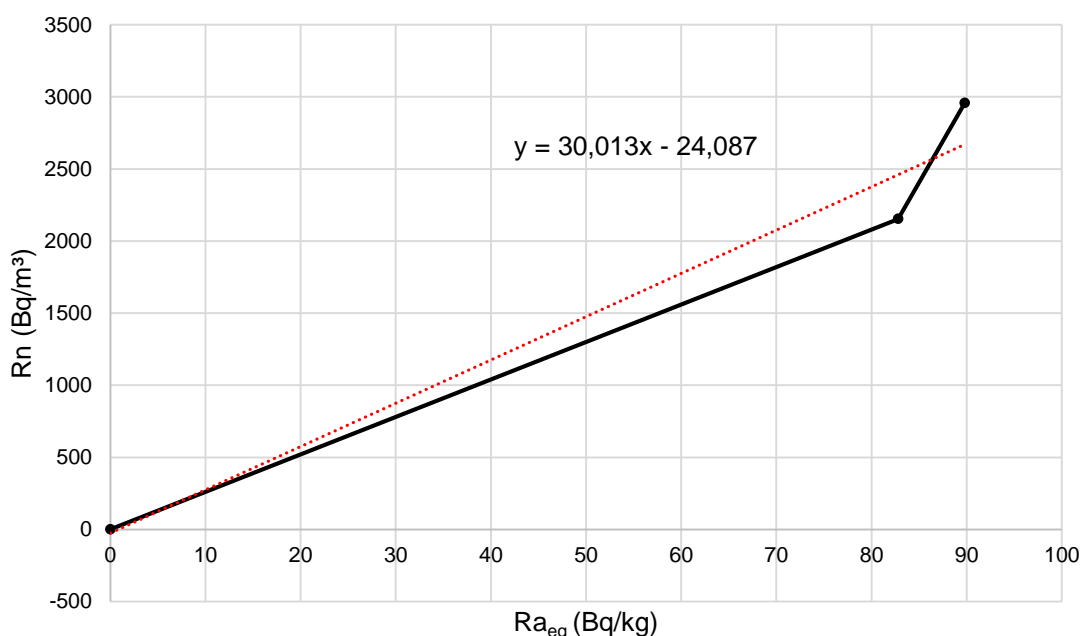


Gráfico 5 - Relação da atividade de Ra_{eq} x concentração de ²²²Rn em corpos de prova de concreto e argamassa de cimento
 Fonte: Autoria própria

Através da Equação (7), definida pela linha de tendência, foi possível inferir a atividade de Ra_{eq} inferida por cada proporção estudada. O erro foi calculado de maneira análoga.

$$C_{Rn} = 30,013 \times A_{RaEq} - 24,087 \quad (7)$$

Para comparar os resultados de Perna (2016) com os resultados de corpos de prova de fosfogesso, é de grande importância notar que, uma vez que a taxa de

exalação de ^{222}Rn no fosfogesso é maior que de concreto e argamassa, a atividade de R_{aeq} para o fosfogesso está sendo considerada na pior situação possível.

Na Equação (7), C_{Rn} representa a concentração de Rn em Bq/m^3 e A_{RaEq} representa a atividade de R_{aeq} em Bq/kg . Os resultados estão apresentados nas Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 - Atividade de R_{aeq} de proporções do tipo A

TIPO	PROPORÇÃO	ATIV. R_{aeq} (Bq/kg)	ERRO (Bq/kg)
GESSO	100:0	0,9	0,8
A	75:25	3,2	1,3
A	50:50	3,1	1,3
A	25:75	3,6	1,4
A	0:100	5,7	1,7

Fonte: Autoria própria

Tabela 24 - Atividade de R_{aeq} de proporções do tipo B

TIPO	PROPORÇÃO	ATIV. R_{aeq} (Bq/kg)	ERRO (Bq/kg)
GESSO	100:0	0,9	0,8
B	75:25	1,1	0,9
B	50:50	1,6	1,0
B	25:75	2,3	1,2
B	0:100	5,2	1,6

Fonte: Autoria própria

Tabela 25 - Atividade de R_{aeq} de proporções do tipo C

TIPO	PROPORÇÃO	ATIV. R_{aeq} (Bq/kg)	ERRO (Bq/kg)
GESSO	100:0	0,9	0,8
C	75:25	1,0	0,8
C	50:50	2,4	1,2
C	25:75	3,4	1,3
C	0:100	3,9	1,4

Fonte: Autoria própria

Apesar de, a partir da atividade de rádio equivalente apenas, não ser possível a determinação exata da concentração de ^{228}Ra e ^{226}Ra nas proporções estudadas, percebe-se claramente que ambas as concentrações apresentarão valores menores que 50 Bq/kg . De acordo com a resolução nº 189 da CNEN, apresentada na Tabela 3, pode-se concluir que o percentual máximo de fosfogesso permissível na mistura é de 100%, ou seja, não há restrição quanto ao uso misturado ao gesso.

Os resultados encontrados para a atividade de Ra_{eq} seguem o padrão da exalação de Rn , aumentando com a adição de fosfogesso. Observa-se através do Gráfico 6, a tendência deste aumento para cada tipo.

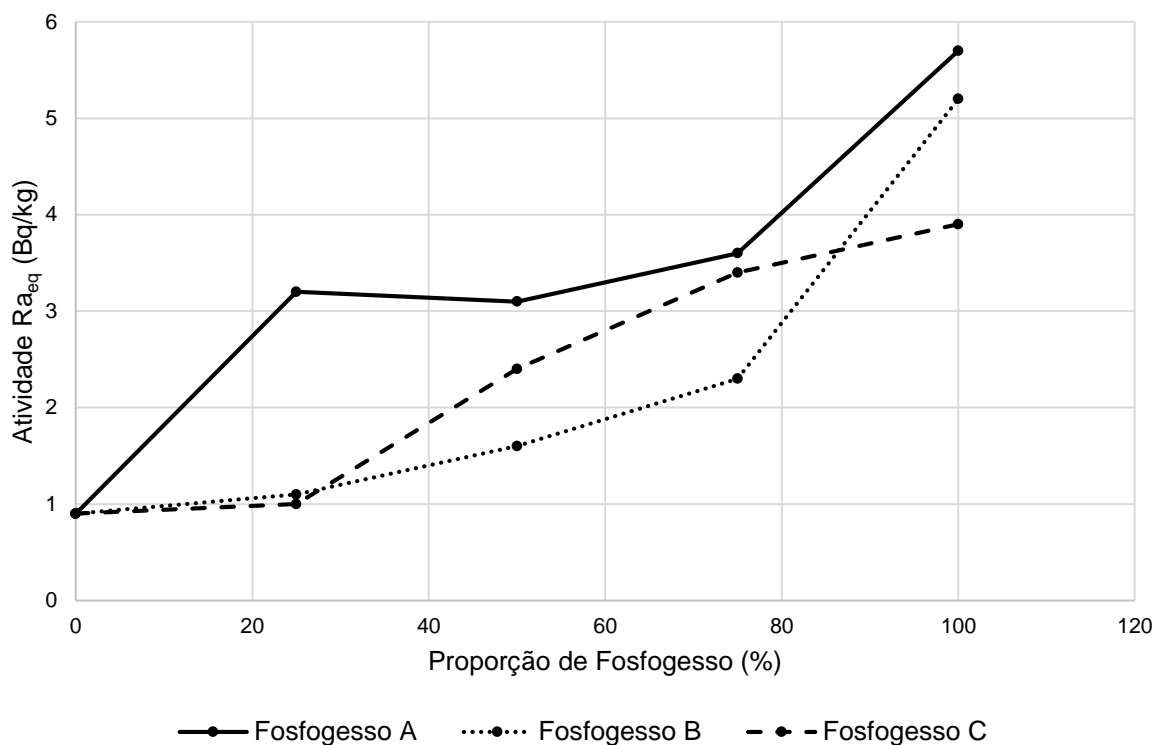


Gráfico 6 - Relação entre concentração de Ra_{eq} e % de fosfogesso presente na mistura
Fonte: Autoria própria

Embora as amostras apresentem um acréscimo de até 633% na atividade de Ra_{eq} através da incorporação de fosfogesso, todas estão muito abaixo do limite declarado pela UNSCEAR (2000) de 370 Bq/kg. Os resultados encontrados para Ra_{eq} estão abaixo dos valores encontrados pelos autores Villaverde (2008) e Saueia *et al.* (2005), indicados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados da atividade de Ra_{eq} de demais autores

REFERÊNCIA	ORIGEM FOSFOGESSO	Ra_{eq} (Bq/kg)
Saueia <i>et al.</i> (2005)	Indústria D	901
	Indústria E	452
	Indústria F	55
Villaverde (2008)	Indústria G	56
	Indústria H	759
	Indústria I	513

Fonte: Autoria própria

A diferença entre os resultados pode ser explicada pela origem do fosfogesso, distinta nos estudos dos autores, e pela despadronização do material, que em um mesmo estudo chega a variar entre 55 Bq/kg e 901 Bq/kg, como mostraram Saueia *et al.* (2005).

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise de resultados dos ensaios realizados neste trabalho, foram obtidas informações necessárias para a classificação do fosfogesso. A faixa de proporções de gesso:fosfogesso estabelecida para os ensaios foi de 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0, de modo a delimitar e caracterizar o comportamento da mistura de gesso e fosfogesso de maneira ampla, buscando uma linha de tendência que possa ditar o comportamento da mistura em qualquer proporção.

A massa unitária foi a única propriedade que apresentou padronização dentre as mesmas proporções, além de indicar uma tendência linear de redução em seu valor através da adição de fosfogesso. Nenhuma amostra dentre as proporções analisadas de gesso+fosfogesso ou fosfogesso puro atingiu o valor mínimo de massa unitária de 600 kg/m³ estabelecido em norma, porém a padronização do material permitiu estimar a proporção de 78,5:21,5 como limite, ou seja, nenhuma proporção contendo mais do que 21,5% de fosfogesso atenderia ao requisito da norma.

O resultado de resistência à compressão do gesso puro foi de 8,0 ± 0,7 MPa, valor que já se apresenta levemente abaixo do indicado pela antiga norma. Ao ser misturado em qualquer proporção com o fosfogesso, chegou ao valor máximo de 5,4 ± 0,4 MPa, 36% abaixo de 8,4 MPa, valor de referência da norma brasileira de 1994 (não vigente). Embora seja possível verificar a falta de padronização do material através dos resultados, é nítida a redução da resistência à compressão nas amostras após a adição de qualquer quantidade de fosfogesso. Estes fatores aliados à similaridade de resultados com outros estudos indicam a inviabilidade da utilização do fosfogesso como material de construção de forma pura ou em mistura com gesso.

A dureza, propriedade ensaiada duas vezes, apresentou valores muito baixos quando comparados com o valor de 20 N/mm² requisitado por norma, apresentando valores máximos de 3,6 N/mm² e 8,7 N/mm² no primeiro e no segundo ensaio, respectivamente. Porém estudos sobre fosfogesso de outros autores também não atingiram o limite mínimo de norma, indicando uma ineficiência do material.

A concentração de radônio *indoor* não ultrapassou o limite de 300 Bq/m³ estabelecido pela CNEN e pela IRCP em nenhuma proporção, portanto não há necessidade da realização de nenhum tipo de investigação e intervenção. A atividade

de $R_{a_{eq}}$ não excedeu o valor de 370 Bq/kg estabelecido como máximo pela UNSCEAR. Estas análises indicam que o fosfogesso estudado, mesmo de modo puro, não apresenta risco à saúde humana quando utilizado como material de construção.

Com base na análise dos resultados apresentados, conclui-se que, mesmo após o beneficiamento do fosfogesso, este não atinge especificações e características mínimas para uso na construção civil de forma pura ou em mistura. Além disso, a falta de padronização apresentada dentre as proporções em grande parte das propriedades impossibilita prever o comportamento do material para demais proporções.

Há de se considerar ainda a possibilidade do gesso utilizado não ser de qualidade que atenda as propriedades físicas e mecânicas requisitadas por norma, devido ao fato deste não ter atingido o mínimo exigido em nenhum quesito, exceto massa unitária.

5.2 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente trabalho mostra a necessidade de estudos complementares que permitam a aplicação do resíduo fosfogesso na construção civil. Como sugestão propõe-se:

- Repetir os ensaios realizados após a adição de aditivos plastificantes no fosfogesso, de modo a melhorar suas propriedades.
- Avaliar as características físicas e mecânicas após beneficiamento térmico com temperaturas variadas.
- Estudo de proporções com relação água/gesso inferior à sugerida pelo fabricante, com o objetivo de aumentar o valor de resistência à compressão.
- Caracterizar o fosfogesso mais detalhadamente, definindo uma quantidade maior de proporções, especificando a ideal para uso na construção civil.

REFERÊNCIAS

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528**: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2017a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: Gesso para construção civil - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2017b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: Gesso para construção civil - requisitos. Rio de Janeiro, 2017c.

ALBUQUERQUE, V.H.C.; TAVARES, J.M.R.S.; FILHO, P.P.R. **Medição automática da dureza Brinell utilizando técnicas de processamento e análise de imagem**. Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Moçambique, 2008.

ARAÚJO, A.P.B.; FERNANDES, A.L.T. **O passivo ambiental do fosfogesso gerado nas indústrias de fertilizantes fosfatados e as possibilidades de aproveitamento**. Enciclopédia Biosfera. Goiânia, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DRYWALL. **Resíduos de gesso na construção civil**: coleta, armazenagem e reciclagem. São Paulo, 2012.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. **Diagnóstico do pólo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para fabricação de cimento**. IV Jornadas IBEROAMERICANAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, Tegucigalpa, 2004.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A.B. **Rochas e Minerais Industriais**, Gipsita, CETEM, Rio de Janeiro, 2005.

BARBOSA, A.A.; FERRAZ, A.V.; SANTOS, G.A. **Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe**. Cerâmica, 2014. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v60n356/v60n356a07.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

BERISH, C.W. **Potential environmental hazards of phosphogypsum storage in central Florida**. Third International Symposium on Phosphogypsum, Bartow, 1990.

BIPM - Bureau international des poids et mesures. **Le Système international d'unités (SI)**. 8^o Ed. Sévres, 2006. Disponível em <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/si_brochure_8.pdf>. Acesso em 15 jun. 2018.

BOURLEGAT, F.M.L. **Disponibilidade de metais em amostras de fosfogesso e fertilizantes fosfatados utilizados na agricultura**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CANUT, M.M.C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

CAVALCANTE, C.F.B.; MIRANDA, A.C.P. **Estudo sobre alternativas para gestão dos resíduos de gesso oriundos da construção civil**. VII Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, Maringá, 2011.

CHANG, W.F. **Reclamation, reconstruction and reuse of phosphogypsum for building materials**. Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, 1987.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. BRASIL, **Posição Regulatória 3.01/007**. Níveis de intervenção e de ação para exposição crônica, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. BRASIL, **Resolução CNEN n°147**, de 20 de março de 2013. Nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira. Publicação: DOU 25.03.2013.

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear. BRASIL, **Resolução CNEN n°189**, de 12 de agosto de 2015. Nível de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil. Publicação: DOU 13.08.2015.

CORRÊA, J.N. **Avaliação da concentração de radônio em ambientes de convívio humano na Região Metropolitana de Curitiba.** Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

COSTA, J.E.B. **Análise comparativa entre as propriedades do gesso obtido de rejeito da produção de sal e gessos comerciais.** Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

DEL CLARO, F. **Avaliação da concentração de radônio-222 no ar de postos de trabalho de Curitiba/PR.** Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DIAS, L.E. **Uso do gesso como insumo agrícola.** Comunicado técnico, Rio de Janeiro, 1992.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy.** McGraw-Hill, Nova Iorque, 1986.

ESTOKOVÁ, A.; PALASCAKOVA, L. **Assessment of Natural Radioactivity Levels of Cements and Cement Composites in the Slovak Republic.** International Journal of Environmental Research and Public Health, Suíça, 2013.

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

FARIA, K.P.; OMBRELLINO, F.H. **Estudo da utilização do fosfogesso na construção civil: pasta para revestimento e argamassa.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERNANDES, H.M.; RIO, M.A.P.; FRANKLIN, M.R. **Impactos radiológicos da indústria de fosfato.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

FOLEK, S.; WALAWSKA, B.; WILCZEK, B.; MISKIEWICZ, J. **Use of phosphogypsum in road construction.** Polish Journal of Chemical Technology, 2011.

HANSON, W.K.; LAIRD, D. **Characteristics of by-product slag from phosphogypsum.** Third International Symposium on Phosphogypsum, Bartow, 1990.

HARB, S.; AHMED, N.K.; ELNOBI, S. **Effect of grain size on the radon exhalation rate and emanation coefficient of soil, phosphate and building material samples.** Journal of Nuclear and Particle Physics, 2016.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection.** Revisão 2016. Viena, 2016.

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

ISSA, S.A.M.; UOSIF, M.A.M.; HEFNI, M.A.; EL-KAMEL, A.H.; MAKRAM, A. **Estimation of the Radiation Hazard Indices from the Natural Radioactivity of Building Materials.** XI Radiation Physics & Protection Conference, Cairo, Egypt. 2012.

KARNI, J.; KARNI, E. **Gypsum in construction: origin and properties.** Materials and Structures, 1995.

KRUGER, P.; SOUZA, A.B.; KONOFAL, W.U. **Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD.** 8º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais. Ponta Grossa, 2013.

KUMAR, P.; KUMAR, S. **Fly ash-lime-gypsum (FaL-G) cementitious binder: Its property in fresh and hardened state.** H.B. Technological Institute, 2003.

LIMA, A.B. **O processo produtivo do cimento Portland.** Monografia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

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

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

MAZZILLI, B.P.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C.H.R.; NISTI, M. B. **Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum.** Journal of Environmental Radioactivity, 1999.

MUNHOZ, F.C.; RENÓFIO, A. **Uso da gipsita da construção civil e adequação para a P+L**. XIII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2006.

NERO, A.V; GADGIL, A.J.; NAZAROFF, W.W.; REVZAN, K.L. **Indoor Radon and Its Decay Products**: Concentrations, Causes, and Control Strategies. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 1990.

NOGUEIRA, J.C.A. Melhoria das propriedades do gesso com aditivo sintético e com látex de *euphorbia tirucalli* e de *hevea brasiliensis* para uso na construção de habitações de interesse social. Dissertação – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

NRC - National Research Council. **Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations**. Health Risks of Radon and other Internally Deposited Alpha-Emitters. Beir IV. Washington, D.C.: National Academy Press, 1988.

NRC - National Research Council. **Committee on Health Risks of Exposure to Radon**. Health Effects of Exposure to Radon. Beir VI. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999.

OLIVEIRA, F.M.C.; BORGES, L.E.P.; MELO, E.B.; BARROS, M.L.S.C. **Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe**. HOLOS, 2012. Disponível em <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1140>>. Acesso em: 05 out. 2017.

OLIVEIRA, S.M.F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PEREIRA, R.R. **Incorporação do fosfogesso como substituto do gesso natural no processo de fabrico de cimento Portland**. Dissertação - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

PERNA, A.F.N. **Taxa de exalação de Radônio-222 de concreto e argamassa de cimento usados na construção civil**. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PORSTENDÖRFER, J. **Properties and Behavior 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. **Phosphogypsum as an alternative building material: preliminary modeling and simulation of radon-222 exhalation from blocks and indoor accumulation.** 11° Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Curitiba, 2006.

RUFO, R.C. **Estudo laboratorial de misturas de fosfogesso, solo tropical e cal para fins de pavimentação.** Dissertação - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

RUTHERFORD, P.M.; DUDAS, M.J.; SAMEK, R.A. **Environmental impacts of phosphogypsum.** Science of the Total Environment, 1994.

SAADAOU, E.; GHAZEL, N.; ROMDHANE, C.B.; MASSOUDI, N. **Phosphogypsum: potential uses and problems - a review.** International Journal of Environmental Studies, 2017.

SANTOS, H.B. **Ensaio de aderência das argamassas de revestimento.** Monografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAPHYMO. **The Reference in Professional Radon Measurement** - AlphaGUARD, 2015. Manual do usuário, Saphymo. Disponível em <http://www.academia.edu/23518941/The_reference_in_professional_radon_measurement>. Acesso em abril de 2018.

SAVI, O. **Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso.** Dissertação - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

SAUEIA, C.H.R. **Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção.** Dissertação - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1998.

SAUEIA, C.H.R.; MAZZILLI, B.P.; FÁVARO, D.I.T. **Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizers in Brazil.** Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 264, Budapeste, 2005.

SCHADECK, J.D. **Análise comparativa entre as características químicas do gesso e do fosfogesso após beneficiamento térmico.** Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SILVA, R. M.; GIULIETTI, M. **Agrominerais para o Brasil: Fosfogesso: Geração, destino e desafios.** 2010. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/918/1/cap7.pdf>>. Acesso em: 09 out. 2017.

SOARES, J.P. **Estudo microestrutural do gesso-alfa produzido pelo processo hidrotérmico e calcinação a seco e sua influência nas propriedades mecânicas pós hidratação.** Dissertação - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SOARES, J.R.R.; FELICIO, B.O.; AMORIM, G.E.S.; FERREIRA, S.B.; GERALDO, R.H.; CAMARINI, G. **Reciclagem de gesso de construção e fosfogesso.** XXIV Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, 2016.

SOBRINHO, A.C.P.L.; AMARAL, A.J.R.; DANTAS, J.O.C.; DANTAS, J.R.A. **Gipsita.** Balanço Mineral Brasileiro, 2001.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. **Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados.** Circular Técnica - EMBRAPA-CPAC, Planaltina, 1995.

TAYIBI, H.; CHOURA, M.; LÓPEZ, F.A.; ALGUACIL, F.J.; LÓPEZ-DELGADO, A. **Environmental impact and management of phosphogypsum.** Journal of Environmental Management, 2009.

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

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

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Health Risk of Radon.** Disponível em <<https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon>>. Acesso em: 15 out. 2017.

VILLAVERDE, F.L. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso.** Dissertação - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

WESTPHAL, F.S.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. **Isolantes térmicos e acústicos para construção civil**, UFSC. Disponível em: <<http://www.concretocelular.com.br/ufsc.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2017.

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