

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

JOÃO DOMINGOS SCHADECK

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO GESSO  
E DO FOSFOGESSO APÓS BENEFICIAMENTO TÉRMICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA  
2017

JOÃO DOMINGOS SCHADECK

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO GESSO  
E DO FOSFOGESSO APÓS BENEFICIAMENTO TÉRMICO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento da Construção Civil - DACOC - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dra. Eliane Betânia Carvalho Costa

Co-orientador: Prof. Dr. Arthur Medeiros

CURITIBA  
2017



Ministério da Educação

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

*Campus Curitiba – Sede Ecoville*

**Departamento Acadêmico de Construção Civil**

**Curso de Engenharia Civil**

---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### ***ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO GESSO E DO FOSFOGESSO APÓS BENEFICIAMENTO TÉRMICO***

Por

**JOÃO DOMINGOS SCHADECK**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido no segundo semestre de 2017 e aprovado pela seguinte banca de avaliação:

---

Orientadora – Eliane Betânia Carvalho Costa, Dra.  
UTFPR

---

Co-Orientador – Arthur Medeiros, Dr.  
UTFPR

---

Profa. Janine Nicolosi Correa, Dra.  
UTFPR

---

Prof. Wellington Mazer, Dr.  
UTFPR

---

**OBS.: O documento assinado encontra-se em posse da coordenação do curso.**

## RESUMO

SCHADECK, João Domingos. Análise comparativa entre as características químicas do gesso e do fosfogesso após beneficiamento térmico. 2017. 50f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Civil, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

O resíduo fosfogesso, gerado na produção de fertilizantes, representa um problema tanto para as indústrias, que tem poucas opções de destinação, quanto para os possíveis afetados pelo impacto ambiental produzido pela sua deposição incorreta em pilhas. A utilização do fosfogesso em substituição total ou parcial do gesso na construção civil significaria a redução do impacto ambiental, possível redução do custo de produção e transporte e redução da exploração de jazidas de gipsita.

O presente trabalho tem como objetivo analisar as características químicas do fosfogesso, *in natura* e após beneficiamento térmico, para utilização como gesso da construção civil. Para isto foram realizados ensaios de caracterização química e ensaios mecânicos com o fosfogesso e um gesso comercial, sendo os resultados comparados com estudos realizados anteriormente.

Apesar de ter apresentado resistência mecânica muito baixa em relação ao gesso comercial, partir dos resultados obtidos foi possível observar que o beneficiamento térmico do fosfogesso resultou em um material de composição química semelhante ao do gesso comercial, revelando-se um processo essencial para utilização do fosfogesso na construção civil.

**Palavras-chave:** Fosfogesso. Gesso. Beneficiamento térmico. Resíduo.

## ABSTRACT

SCHADECK, João Domingos. Comparative analysis between the chemical characteristics of the gypsum and the phosphogypsum after thermal processing. 2017. 50f. Course Completion Work - Civil Engineering, Civil Construction Department, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2017.

The phosphogypsum residue, generated in the production of fertilizers, represents a problem for both the industries that have few disposal options and those who are affected by the environmental impact caused by their incorrect disposal in piles. The use of phosphogypsum in total or partial replacement of gypsum in civil construction would mean the reduction of the environmental impact, possible reduction of the cost of production and transportation and reduction of gypsum deposits exploitation.

The present work has the objective of analyzing the chemical characteristics of phosphogypsum, *in natura* and after thermal processing, for use as civil construction gypsum. For this purpose, chemical characterization and mechanical tests were carried out with phosphogypsum and a commercial gypsum powder, and the results were compared with previous studies.

Despite showing a very low mechanical resistance in comparison to the commercial gypsum plaster, from the results obtained it was possible to observe that the thermal processing of the phosphogypsum resulted in a material of chemical composition similar to that of the commercial gypsum powder, proving to be an essential process for the use of phosphogypsum in civil construction.

**Keywords:** Phosphogypsum. Gypsum. Thermal processing. Residue.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Descarte de fosfogesso (a) pilha de fosfogesso e (b) lagoas de sedimentação.....	8
Figura 2 - Processo de geração do fosfogesso pela via úmida.....	16
Figura 3 - Pilhas de fosfogesso na província de Sichuan - China.....	19
Figura 4 - Procedimento de destorroamento e peneiramento do fosfogesso.....	26
Figura 5 - Aquecimento dos materiais na mufla.....	27
Figura 6 - Amostras para medição com EDXRF.....	29
Figura 7 - Equipamento utilizado no ensaio de EDXRF.....	29
Figura 8 - Pontos utilizados na medição.....	30
Figura 9 – Corrosão no molde de gesso.....	32
Figura 10 – Corrosão no molde de fosfogesso beneficiado.....	32
Figura 11 – Retração no corpo de prova de fosfogesso <i>in natura</i> .....	33
Figura 12 - Curvas TG do fosfogesso <i>in natura</i> e do gesso comercial.....	34
Figura 13 - Curvas DSC do fosfogesso <i>in natura</i> e do gesso comercial.....	35
Figura 14 - Curvas TG e DTG da gipsita.....	36
Figura 15 - Curvas TG e DTG da gipsita (carago).....	37
Figura 16 - Análise térmica do fosfogesso (Canut) .....	38
Figura 17 - Análise térmica do gesso (Canut).....	38
Figura 18 - Espectro de difração das amostras de gesso comercial.....	41
Figura 19 - Espectro de difração das amostras de fosfogesso.....	42
Figura 20 - Comparação dos espectros de difração das amostras de gesso e fosfogesso beneficiado.....	42

## LISTA DE TABELAS

Quadro 1 – Composição teórica dos sulfatos de cálcio.....	13
Tabela 1 – Composição porcentual de gessos de construção civil brasileiros.....	14
Tabela 2 – Comparativo das propriedades químicas de dois tipos de fosfogesso e gesso da construção civil.....	17
Tabela 3 – Porcentagens permitidas para mistura de fosfogesso e gesso comum.....	22
Quadro 2 – Resumo de beneficiamentos empregados em trabalhos anteriores...	23
Tabela 4 – Comparação entre elementos presentes em amostras de gesso e fosfogesso.....	40
Tabela 5 – Compostos identificados no ensaio de difratometria de raios X do gesso.....	40
Tabela 5 – Compostos identificados no ensaio de difratometria de raios X do fosfogesso.....	40
Tabela 6 – Resistência à compressão axial.....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	8
1.1	OBJETIVOS.....	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	11
2.1	GESSO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	11
2.1.1	BENEFICIAMENTO DA GIPSITA PARA A OBTENÇÃO DO GESSO.....	12
2.1.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	13
2.2	FOSFOGESSO.....	14
2.2.1	GERAÇÃO DO FOSFOGESSO.....	15
2.2.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	17
2.2.3	DESCARTE E IMPACTO AMBIENTAL DO FOSFOGESSO.....	18
2.2.4	CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO: FOSFOGESSO.....	20
2.2.5	RADIOATIVIDADE.....	20
2.2.6	BENEFICIAMENTO DO FOSFOGESSO.....	22
2.2.7	APLICAÇÃO DO FOSFOGESSO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	24
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	25
3.1	MATERIAIS.....	25
3.2	MÉTODOS DE ENSAIO.....	27
3.2.1	ANÁLISES TÉRMICAS (TG/DSC) .....	27
3.2.2	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	28
3.2.3	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	30
3.2.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
4.1	ANÁLISES TÉRMICAS.....	34
4.2	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	39
4.3	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	40
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	44
5.1	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	46
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	47



## 1 INTRODUÇÃO

A produção de fertilizantes agrícolas fosfatados gera um resíduo chamado fosfogesso. Segundo Silva e Giuliatti (2010) a produção mundial de fosfogesso pode ser estimada em 170 milhões de toneladas por ano e no Brasil chega-se a uma geração de 5,6 milhões de toneladas ao ano. Desses resíduos, apenas 14% são reprocessados (COSTA, 2011) e o restante, são destinados sob responsabilidade da indústria geradora. Geralmente, o descarte é realizado basicamente de três maneiras: (a) retorno à mina de exploração; (b) empilhamento ao ar livre; e (c) descarregamento em rios e oceanos (SILVA; GIULIETTI, 2010).

Na Figura 1 estão ilustradas situações de armazenamento em pilhas a céu aberto e em lagoas de sedimentação.

**Figura 1 – Descarte de fosfogesso (a) pilha de fosfogesso e (b) lagoas de sedimentação**



(a)



(b)

Fonte: Oliveira (2014)(a); Canut (2006)(b).

O manuseio e disposição inadequados do fosfogesso pode resultar numa série de potenciais riscos ao meio ambiente, como: contaminação de mananciais de água, do solo superficial e do subsolo, ocasionadas pela lixiviação dos metais pesados e de substâncias ácidas provenientes do material (OLIVEIRA, 2005).

Considerando que a produção de ácido fosfórico é proporcional ao da produção agrícola e esta segue a tendência do aumento populacional, cria-se um cenário de aumento gradativo da geração do resíduo fosfogesso. Implicando também em uma demanda por métodos de reaproveitamento do resíduo (OLIVEIRA, 2014). No entanto, cabe uma análise da viabilidade para a utilização deste.

A construção civil é uma das indústrias de maior consumo de matérias primas, e, conseqüentemente, causa um grande impacto ambiental. Isso faz com que esta desempenhe um papel importante na prevenção da degradação ambiental.

Sendo assim, deve-se buscar a reciclagem e reuso de materiais nesta área, assim como a substituição de matérias-primas por produtos ecologicamente viáveis (CANUT, 2006).

Por apresentar características similares às do gesso natural, pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar a viabilidade na aplicação de fosfogesso na construção civil como: blocos e tijolos de vedação (DEGIRMENCI, 2008a; MELO e SILVA, 2013; COSTA et al., 2014); isolante térmico (SILVA; MORAES; SANTOS, 2012); pavimentação (OLIVEIRA, 2005); revestimentos seja na forma de pasta ou argamassa (OLIVEIRA, 2014).

Porém, apesar das semelhanças entre os dois materiais, o fosfogesso ainda encontra dificuldades em sua aplicação efetiva na construção civil, fruto da falta de trabalhos investigativos que comprovem sua viabilidade e potenciais consequências de sua utilização como material. Além disso, também há uma preocupação acerca das impurezas presentes no fosfogesso, tais como fósforo, metais pesados, radioatividade e acidez residual. Essas impurezas resultam da origem da rocha e do processo de produção.

Quanto aos fatores econômicos, a viabilidade da utilização do fosfogesso ao invés do gesso se baseia no fato de que além do custo do beneficiamento – produção de hemidrato a partir do diidrato – que é um processo necessário aos dois materiais, o gesso natural implica em custos do uso da terra, da extração e da produção industrial (OLIVEIRA, 2014). Outro fator que influencia no aumento do custo do gesso natural é o transporte da região Nordeste – pólo principal de produção de gesso – onde é extraído até o centro consumidor (região sudeste do Brasil). Grandes quantidades de fosfogesso são produzidas nessas regiões (CANUT, 2006).

Em estudo sobre a viabilidade da utilização do fosfogesso como material de construção, Canut (2006) concluiu que a substituição do gesso natural pelo resíduo é extremamente viável. Sendo assim, considerando que o reaproveitamento do resíduo resultaria tanto na redução da degradação ambiental das áreas onde é depositado, quanto no auxílio à preservação das reservas de gipsita. Levando em conta a abundância e baixo custo do material, é de extrema importância a pesquisa visando o desenvolvimento de possíveis usos do fosfogesso, dos pontos de vista econômicos, sociais e ambientais (SAUEIA, 1998).

Por ser um resíduo abundante, a utilização do resíduo fosfogesso como forma de reaproveitamento pode vir a reduzir ou acabar com a exploração de jazidas de gesso natural. O que é de extrema importância, tanto na área de preservação ambiental, quanto do ponto de vista econômico-social. Sendo assim, a avaliação das propriedades do fosfogesso para o uso na construção civil justifica este trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar as alterações químicas de uma amostra de fosfogesso após beneficiamento térmico em comparação ao gesso da construção civil.

São objetivos específicos:

- Analisar a influência da temperatura de beneficiamento na composição química do fosfogesso.
- Estudo comparativo das propriedades químicas do fosfogesso, antes e após o beneficiamento térmico, com um gesso comercialmente utilizado na construção civil.
- Estudo comparativo dos resultados encontrados neste trabalho com outros trabalhos que realizaram análises similares.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 GESSO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

O gesso é um aglomerante aéreo, caracterizado como um pó branco de extrema finura e origem mineral, resultante do processo de fragmentação e calcinação da gipsita, que ocorre em temperaturas entre 140°C a 160°C (OLIVEIRA, 2014).

A norma NBR 13207 (ABNT, 1994) define gesso para a construção civil como: um “material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de tempo de pega. ”

A gipsita é um mineral encontrado em diversas regiões do mundo, e é basicamente composta de um sulfato de cálcio diidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Uma das características da gipsita é a facilidade de desidratação e reidratação, convertendo-se em sulfato hemidratado de cálcio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) após a calcinação. Desta forma, pode ser moldado e trabalhado quando misturado com água, adquirindo consistência mecânica na forma estável reidratada (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

No ano de 2014, a produção de gipsita no Brasil foi de 3,45 milhões de toneladas, o que representa 1,4% da produção mundial. Estima-se que exista uma reserva de 400 milhões de toneladas no país. As reservas com melhores condições de aproveitamento situam-se no chamado pólo gesseiro do Araripe, fronteira entre os estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, sendo o estado de Pernambuco o principal produtor de gipsita do Brasil, responsável em 2013, por 84,3% do total produzido (DNPM, 2015).

A exploração elevada da gipsita, devido à crescente produção e demanda do gesso, tem ocasionado em uma falta de controle dos impactos gerados ao meio ambiente. O uso de lenha para calcinação da gipsita, grande parte de origem clandestina, tem gerado desmatamento na região do Araripe, causando grande degradação ambiental (OLIVEIRA, 2014).

O gesso é utilizado como material em diversas áreas, medicina, odontologia, na indústria farmacêutica e alimentícia (CANUT, 2006). Porém, é na construção civil

onde se encontra o seu maior consumo. Dentre seus usos pode-se destacar a fabricação de pré-moldados e revestimento de paredes e tetos (OLIVEIRA, 2014).

### 2.1.1 BENEFICIAMENTO DA GIPSITA PARA A OBTENÇÃO DO GESSO

De acordo com Baltar, Bastos e Luz (2005) o beneficiamento da gipsita consiste basicamente num processo de seleção manual, britagem, moagem e peneiramento resultando em um produto de distribuição granulométrica uniforme. Esse processo é importante para evitar a desidratação desigual das partículas. Após estas etapas, a gipsita moída pode passar por uma secagem em temperatura máxima de 50°C, a fim de remover a umidade e facilitar o manuseio. O processo de calcinação deve ser feito de forma a promover uma distribuição e desidratação regular do material.

Dependendo do processo de calcinação pode-se obter duas variedades de gesso, conhecidas como gesso beta e gesso alfa que são hemidratos e possuem várias aplicações industriais. Na construção civil é utilizado o gesso beta, que se divide em gesso de fundição e gesso de revestimento manual. Estes gessos se diferenciam pelo tempo de pega, que é determinado pelo processo de calcinação (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2003).

A produção do gesso  $\beta$  consiste nos processos de catação manual, britagem, moagem e calcinação em fornos sob pressão atmosférica, em temperaturas que variam de 125°C a 160°C. Dessa forma, ocorre a rápida liberação da água de cristalização, que resulta em cristais de forma irregular e natureza esponjosa (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005).

Esse material tem sido utilizado para obtenção de diversos produtos da construção civil, como: pré-moldados de gesso; placas para rebaixamento de tetos; blocos para paredes divisórias; gesso para isolamento térmico e acústico; gesso para portas corta fogo; revestimento de aplicação manual; gesso de projeção, para aplicação mecanizada de revestimento de parede; gesso com pega retardada; gesso cola (BALTAR; BASTOS; LUZ., 2005).

### 2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O gesso utilizado na construção civil é constituído basicamente de sulfatos de cálcio em diferentes formas: hemidrato, anidritas solúvel e insolúvel e gipsita residual da matéria-prima (Quadro 1). O processo de calcinação irá determinar a proporção desses compostos, que junto com a finura e presença de inertes no material, irá determinar as propriedades do gesso, tanto no estado fresco como endurecido, alterando o seu tempo de pega e resistência mecânica (JOHN; CINCOTTO, 2010).

**Quadro 1 – Composição teórica dos sulfatos de cálcio**

Sulfato de cálcio	Nome comum	Forma	Temperatura de obtenção	Solubilidade
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Gipsita	Diidrato	<100°C	Solúvel
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Bassanita	Hemidrato	140°C-160°C	Solúvel
$\text{CaSO}_4$	Anidrita	Anidrita III	160°C-250°C	Solúvel
$\text{CaSO}_4$	Anidrita	Anidrita II	300°C-1000°C	Insolúvel
$\text{CaSO}_4$	Anidrita	Anidrita I	>1000°C	Insolúvel

Fonte: John; Cincotto (2010).

O hemidrato ou hemidrato- $\beta$  ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) é a fase mais comum nos gessos de construção. Dependendo das condições de temperatura e pressão a que cada partícula individual foi submetida, durante o processo de calcinação e até mesmo durante o armazenamento, o número de moléculas de água de cristalização varia de 0,15 a 0,66, com valor típico de 0,5 – de onde vem o nome hemidrato. A anidrita III de fórmula ( $\epsilon$  varia entre 0,06 e 0,11) é uma fase intermediária, age como acelerador de pega, e pode estar presente no gesso em pequenas parcelas. A anidrita II se presente no gesso causa uma diminuição da porosidade, e consequentemente aumento das resistências mecânicas e dureza. No entanto, reage lentamente com a água, podendo levar sete dias para se hidratar completamente. Se calcinada a temperaturas entre 700°C e 800°C hidrata-se apenas após alguns meses. A anidrita I, é uma fase definida como não pura, pois

contém óxido de cálcio oriundo do início da dissociação térmica do  $\text{CaSO}_4$ . Apresenta um tempo de pega e consolidação lentos, resultando numa massa dura e tenaz. A gipsita também pode estar presente no material, por razões de moagem grossa da matéria-prima, calcinação insuficiente ou mesmo em teores desejados, agindo como acelerador de reação (JOHN; CINCOTTO, 2010).

Na Tabela 1 estão exemplificados a composição química percentual de gessos de construção civil brasileiros segundo trabalho de John e Cincotto (2010).

**Tabela 1 – Composição percentual de gessos de construção civil brasileiros**

Espécies químicas	Amostras			
	A	B	C	D
Umidade	1,18	-	0,2	-
Hemidrato	57,5	71,1	89,5	92,58
Anidrita	30,5	23,4	6,77	-
Gipsita	-	-	-	4,1
Impurezas	3,88	0,89	1,07	0,92
Carbonato de magnésio	1,44	1,3	0,61	0,63
Carbonato de cálcio	4,63	1,04	1,38	0,94
Cal livre	2,08	1,02	-	0,7
Total (sem umidade)	100,03	98,75	99,33	99,89

Fonte: John; Cincotto (2010).

John e Cincotto (2010) observam que a fase hemidrato é predominante, porém apresenta variabilidade comparando as quatro amostras de gesso. A fase gipsita foi detectada somente na amostra D e, possivelmente, deve ser resultante de condições de calcinação e/ou armazenamento inadequados. A amostra A apresenta menor teor de hemidrato em comparação às demais e um elevado teor de anidrita. A quantidade de impurezas é inferior a 4%, provavelmente proveniente de argilominerais e quartzo.

## 2.2 FOSFOGESSO

O fosfogesso é o resíduo oriundo das indústrias de fertilizantes co-produto da produção de ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), o qual é utilizado na correção de solos para agricultura (CANUT, 2006).

Denominado fosfogesso por apresentar resíduos de fósforo em sua composição, o resíduo também é conhecido como subproduto de gesso, gesso químico, resíduo de gesso, gesso agrícola e gesso sintético (NUERNBERG; RECH; BASSO, 2005).

Entre os maiores produtores de ácido fosfórico do mundo e, por consequência, de fosfogesso, estão Estados Unidos (30%), Marrocos (9%), Rússia (8%), China (8%) e Índia (5%), sendo o Brasil o nono produtor mundial com 2% da produção mundial, cerca de 150 milhões de toneladas ao ano (OLIVEIRA, 2014).

Devido à grande quantidade gerada mundialmente, o fosfogesso é considerado o mais importante dos resíduos de gesso. Apesar de apresentar um grande potencial de aplicação na construção civil (CANUT, 2006), podendo substituir o gesso, o fosfogesso encontra atualmente sua maior aplicação na agricultura, onde é utilizado como fonte de nutrientes para plantas, além de condicionador e melhorador de solos (NUERNBERG; RECH; BASSO, 2005).

Nacionalmente, ainda não há a regularização do fosfogesso como material de construção e não existe uma norma específica para seu uso. Sendo assim, apenas uma pequena parcela do resíduo é aproveitada e sua maior parte é armazenada ao ar livre, em grandes quantidades, junto aos locais de produção (VILLAVERDE, 2008).

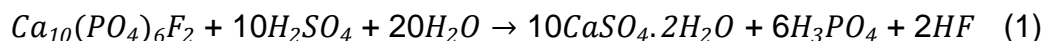
### 2.2.1 GERAÇÃO DO FOSFOGESSO

O ácido fosfórico tem como sua matéria prima a rocha fosfática, que após ser beneficiada, necessita de um ataque químico com ácido sulfúrico em meio aquoso para aumentar a solubilidade. Este processo se dá por dois métodos: via seca e via úmida (VILLAVERDE, 2008).

O processo por via seca apresenta um custo elevado, pois consiste no tratamento da rocha fosfática em forno elétrico de alta temperatura, resultando em um ácido fosfórico de alta pureza, que é destinado aos setores farmacêuticos e de alimentos (PAES, 2001; SANTOS, 2002). Neste processo o sulfato é cristalizado na forma anidra ( $\text{CaSO}_4$ ) (JOHN; CINCOTTO, 2010).



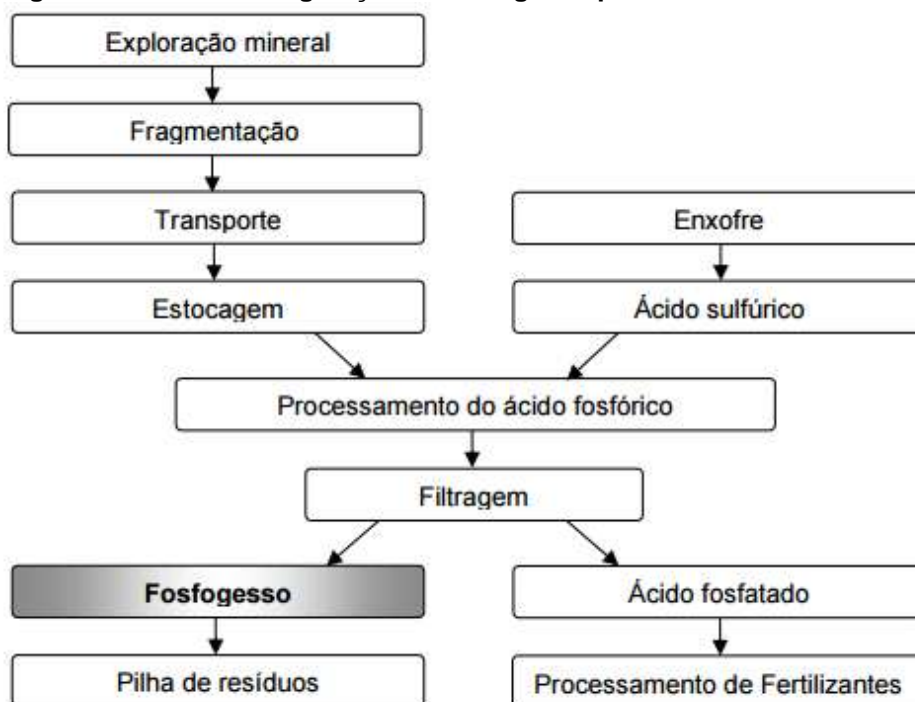
No processo por via úmida ocorre o tratamento da rocha fosfática concentrada com ácido sulfúrico e água resultando em sulfato de cálcio hidratado (fosfogesso), ácido fosfórico e fluoreto de hidrogênio como na reação 1 (VILLAVARDE, 2008):



em que:  $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$  – rocha fluorapatita;  $H_2SO_4$  – ácido sulfúrico;  $H_2O$  – água;  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  – fosfogesso na forma de diidrato;  $H_3PO_4$  – ácido fosfórico;  $HF$  – ácido fluorídrico.

Na Figura 2 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de obtenção do ácido fosfórico e da geração do fosfogesso por via úmida.

**Figura 2 - Processo de geração do fosfogesso pela via úmida**



Fonte: Bourlegat retirado de Oliveira (2014)

Estima-se que 85% da produção mundial são por via úmida, sendo a forma diidratada do sulfato de cálcio a mais comum devido à sua economia e facilidade de adaptação do processo industrial (ROSA, 1997). Porém, apesar de ter um custo relativamente menor de produção, é o processo em que o fosfogesso é gerado com maiores teores de impurezas (VILLAVARDE, 2008).

### 2.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

De um modo geral, o fosfogesso é composto basicamente dos elementos cálcio e enxofre, apresentando a mesma base química do gesso oriundo da gipsita (diidrato; hemidrato e anidro). A presença de uma fase em relação a outra ocorre principalmente devido às variações de temperatura na reação entre o ácido sulfúrico e a rocha fosfatada, a velocidade de dissolução da rocha fosfática, pelas concentrações de ácido fosfórico e o processo de filtração (ORTIZ, 1997; MATOS, 2011).

Freitas (1992) comparando as características químicas do fosfogesso diidratado de Minas Gerais, Santa Catarina, Goiás (Brasil) e no estado da Flórida (EUA), verificou que a composição química do resíduo varia de acordo com o processo de geração, assim como a origem da rocha fosfática utilizados no processo de formação do ácido fosfórico.

Canut (2006) salienta que o fosfogesso é um material heterogêneo, cujas propriedades e composições variam em função de sua origem. Na Tabela 2 são apresentados dados obtidos por Canut (2006) traçando um comparativo entre a composição química de amostras de fosfogesso *in natura*, fosfogesso beneficiado através de processo térmico, e gesso natural.

**Tabela 2 – Comparativo das propriedades químicas de dois tipos de fosfogesso e gesso da construção civil**

Óxidos (%)	Fosfogesso <i>in natura</i>	Fosfogesso Beneficiado	Gesso
SO <sub>4</sub>	58,12	66,81	65,61
CaO	40,12	40,97	39,88
SiO <sub>2</sub>	1,99	1,96	0,19
TiO <sub>2</sub>	1,62	1,65	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,17	1,08	-
MgO	0,10	0,11	0,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	1,13	0,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,60	0,58	0,17
Na <sub>2</sub> O	0,05	0,04	-
K <sub>2</sub> O	0,03	0,03	0,03
ZnO	0,00	-	-
Cu <sub>2</sub> O	0,01	-	-
MnO <sub>3</sub>	0,03	0,03	0,02
PPC (%)	23,10	9,64	12,40

Fonte: Canut (2006)

Existem vários elementos químicos que podem ser considerados impurezas no fosfogesso, entre eles os metais pesados: arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), selênio (Se) e prata (Ag), assim denominados por possuírem massa atômica elevada (OLIVEIRA, 2005). No entanto, segundo Oliveira (2014) as impurezas presentes no resíduo, resultantes dos minerais de origem, não representam valores significativos em sua composição química.

Em geral, os teores de metais pesados, fluoretos, radioatividade e outras impurezas menores encontrados nas rochas brasileiras são menores do que nas rochas de outros países (MATOS, 2011).

### 2.2.3 DESCARTE E IMPACTO AMBIENTAL DO FOSFOGESSO

A geração de resíduos é uma consequência inevitável em quase toda produção industrial. O resíduo fosfogesso tem sido motivo de preocupação dos órgãos ambientalistas. Pelo fato de que a demanda crescente de produção, que implica no aumento da geração do resíduo, associados aos níveis insignificantes de aproveitamento do resíduo, resultam em um armazenamento impróprio do material. Grandes volumes são armazenados sem maior controle em pilhas a céu aberto ou depositados em aterros sanitários, ocupando grandes áreas e prejudicando o meio ambiente (OLIVEIRA, 2014).

Existem três formas de descarte do resíduo fosfogesso: bombeamento para rios e oceanos; formação de pilhas a úmido e formação de pilhas a seco (WISSA; FULEIHAN, 1980; FREITAS, 1992). O descarte do fosfogesso é determinado levando em conta as condições de disponibilidade e custo das áreas para deposição, da localização da fábrica e da legislação ambiental local. O método mais adotado pelas produtoras é o empilhamento do resíduo em áreas próximas às fábricas, que pode ser feito em pilhas “a úmido” ou “a seco” (OLIVEIRA, 2005).

Na disposição “a seco”, o fosfogesso é depositado da unidade de ácido fosfórico, transportado por correias ou caminhões e acumulado em pilhas nas áreas de disposição final (OLIVEIRA, 2005). Porém, a forma mais comum de deposição é realizada “a úmido”, onde o fosfogesso é descartado juntamente com a água

residual da unidade de ácido fosfórico, então bombeado para lagoas de sedimentação, onde é decantado, seco, e acumulado em pilhas nas áreas destinadas (FREITAS, 1992).

Não sendo armazenado de forma correta, o fosfogesso pode apresentar vários problemas para o meio ambiente, sendo que a falta de meios de reaproveitamento do resíduo gera problemas de aterro e poluição ambiental (DEGIRMENCI, 2008a).

A lixiviação dos metais pesados e de substâncias ácidas provenientes do material também podem causar contaminação de mananciais de água, do solo superficial e do subsolo, trazendo sérios riscos ao meio ambiente (OLIVEIRA, 2005).

Na Figura 3 tem-se um exemplo de impacto ambiental causado por uma pilha de fosfogesso localizada próxima a um vilarejo rural.

**Figura 3 - Pilhas de fosfogesso na província de Sichuan - China**



Fonte: Greenpeace (2016)

De acordo com a Resolução 307/02 do CONAMA (2016) é responsabilidade do gerador garantir o confinamento dos resíduos desde sua geração até a etapa de transporte, assegurando sempre que possível, as condições de reutilização e de reciclagem.

#### 2.2.4 CLASSIFICAÇÃO DO RESÍDUO: FOSFOGESSO

Tendo em vista a sua reciclagem, é imprescindível a classificação do fosfogesso como resíduo, sendo que para sua devida utilização, as decisões técnicas e econômicas devem ser tomadas com base na sua classificação, determinando os métodos de tratamento do material, como: manipulação, armazenagem, coleta, transporte e disposição final (CANUT, 2006).

Para classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, deve ser observada a norma NBR 10004 (ABNT, 2004). Essa norma determina quais resíduos devem ter controle mais rígido em seu manuseio e destinação e classifica os resíduos em: classe I - perigosos; classe II - resíduos não perigosos, a qual é subdividida em: a) classe II A - resíduos não inertes; b) classe II B - resíduos inertes.

Segundo Canut (2006) o fosfogesso sendo um resíduo inerte não perigoso, se encaixa na classe II B.

Levando em conta a presença significativa de radioatividade no fosfogesso, o resíduo deve também ser classificado neste aspecto. O termo "NORM" (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) é usado para classificar minérios que contêm material radioativo de ocorrência natural. Por outro lado, "TENORM" (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) é a classificação para rejeitos e subprodutos contendo material radioativo de ocorrência natural concentrado tecnologicamente. Observando-se que no processo de produção de fertilizantes e conseqüente geração do fosfogesso ocorre uma quebra do equilíbrio radioativo da rocha fosfática, o resíduo fosfogesso se enquadra no termo "TENORM" (CANUT, 2006).

#### 2.2.5 RADIOATIVIDADE

A radioatividade natural, presente nos minérios de fosfato, tem origem nas séries de decaimento do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . O tipo da rocha influencia os níveis de radioatividade apresentados, sendo que as rochas sedimentares apresentam

maiores concentrações de urânio e baixas concentrações de tório; as de origem ígnea contêm baixas concentrações de urânio e altas concentrações de tório e terras raras. Como consequência, os processos envolvendo a rocha fosfática, assim como os produtos gerados a partir dela, podem ser fontes de urânio, tório e de radionuclídeos de suas séries de decaimento no meio ambiente (VILLAVERDE, 2008).

Uma das impurezas presentes no fosfogesso, o  $^{226}\text{Ra}$ , tem como resultado de seu decaimento o gás radônio  $^{222}\text{Rn}$ . A exalação do gás  $^{222}\text{Rn}$  proveniente do uso do fosfogesso como material de construção, em especial em áreas com baixa ventilação, pode implicar em impactos radiológicos por ter um potencial cancerígeno (RABI; SILVA, 2005).

O baixo nível de exalação de  $^{222}\text{Rn}$  no fosfogesso pode estar relacionado ao alto teor do elemento tório na rocha fosfática brasileira. Sendo que tanto a rocha mãe que dá origem ao fosfogesso no Brasil, tanto como o resíduo possuem baixos níveis de radioatividade natural. É importante considerar que a característica geológica da rocha tem bastante influência no teor de radionuclídeos (CANUT, 2006).

O impacto ambiental causado pela presença de radioatividade no fosfogesso é outro motivo de preocupação por parte dos ambientalistas. De acordo com Oliveira (2014), o fosfogesso gerado no Brasil apresenta baixos níveis de radioatividade. Segundo Mazzili (2005), a radioatividade medida no fosfogesso não inviabiliza seu reaproveitamento como insumo aplicável à construção civil. Porém, os efeitos causados pelas suas partículas radioativas ainda não foram plenamente avaliados (OLIVEIRA, 2005).

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) considera que o fosfogesso pode conter concentrações variadas de rádio-226 e rádio-228, podendo acarretar em exposição indevida do público à radiação ionizante. Estabelecendo o valor limite de 1.000 Bq/kg para concentração de atividade de rádio-226 ou de rádio-228, para cada radionuclídeo, como nível de dispensa para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira (CNEN, 2014).

A CNEN, por meio de resolução, determina que para uso na construção civil, a diluição de fosfogesso em gesso comum deve ser realizada dentro da instalação mineiro-industrial sob controle regulatório da CNEN, levando em conta os valores de concentrações de atividade de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$ , determinados em laboratórios

reconhecidos pela CNEN e os respectivos fatores de diluição. Para isto, devem ser respeitadas as percentagens, em massa, de fosfogesso na mistura com gesso comum expressas na Tabela 3, em função das concentrações máximas de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  presentes no fosfogesso (CNEN, 2015).

**Tabela 3 – Percentagens permitidas para mistura de fosfogesso e gesso comum**

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

Fonte: CNEN (2015)

Tendo em vista que a radioatividade medida no fosfogesso é da mesma magnitude da observada nos fertilizantes, pode-se concluir que aproveitamento do fosfogesso como insumo aplicável à construção civil no Brasil é viável (MAZZILI, 2005).

## 2.2.6 BENEFICIAMENTO DO FOSFOGESSO

As impurezas presentes no fosfogesso provindas da apatita ou de subprodutos do seu processamento, tais como matéria orgânica, fluoretos, ácido fosfórico e fosfatos interferem de forma prejudicial nas propriedades do material (JOHN; CINCOTTO, 2010). Pesquisas foram realizadas para remoção destas impurezas do fosfogesso, concluindo que apesar de existirem métodos de purificação do material, esta forma de beneficiamento é economicamente inviável (CANUT, 2006).

O fosfogesso ao passar por um processo de beneficiamento, que consiste em peneiramento e desidratação, tem suas propriedades como material de construção melhoradas. Isto proporciona ao resíduo viabilidade técnica ao ser utilizado como material na construção civil em substituição ao gesso de construção (CANUT, 2006). Porém, segundo Oliveira (2005) sua viabilidade depende também de fatores econômicos, como a disponibilidade do resíduo e a competitividade com o gesso da gipsita.

O beneficiamento térmico do fosfogesso *in natura*, consiste em um processo semelhante a calcinação da gipsita. Isto porque ambos possuem composições parecidas, sendo basicamente compostos de sulfato de cálcio diidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Assim, para a obtenção de um fosfogesso com composição química similar ao gesso utilizado na construção civil, deve-se aquecer o sulfato de cálcio diidratado a uma temperatura suficiente para sua desidratação, formando assim uma fase hemidrato- $\beta$  ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ).

Estudos realizados com o fosfogesso mostram a adoção de diferentes processos de beneficiamento, com variações de tempo e temperatura. No Quadro 2 está apresentada uma compilação de processos empregados em diferentes trabalhos, todos realizados com fosfogesso na forma de diidrato com objetivo de se obter o hemidrato beta. Essas diferenças de procedimentos adotados demonstram a necessidade de realização de estudos que indiquem a forma mais adequada de beneficiamento do material.

**Quadro 2 – Resumo de beneficiamentos empregados em trabalhos anteriores**

Referência	Secagem		Beneficiamento		Peneiramento
	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo	
Oliveira (2014)	Ao ar livre	Indefinido	110°C	24 horas	Sim, adequado aos ensaios
Canut (2006)	60°C	24 horas	180°C	1 hora	Sim, malha de 0,71 mm
Alves (2015)	Ao ar livre	Indefinido	130°C	5-7 dias	Apenas para ensaio
Degirmenci (2008b)	Ao ar livre	Indefinido	150°C	2 horas	Sim, malha de 4,75 mm

Fonte: Autoria própria (2016)



### 2.2.7 APLICAÇÃO DO FOSFOGESSO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Por apresentar características físicas e químicas semelhantes ao gesso da gipsita, o fosfogesso está ganhando espaço na construção civil, sendo utilizado em misturas com o gesso natural ou em sua substituição. Segundo Oliveira (2014), o fosfogesso pode ser utilizado na confecção de uma variedade de materiais de construção, por exemplo: na fabricação de artefatos, na fabricação de placas para forro, molduras, painéis decorativos, sancas etc., em blocos pré-moldados, na composição de argamassas de contrapisos, revestimentos verticais e horizontais.

O fosfogesso também pode ser aplicado na composição de argamassas, em substituição do gesso natural, ou até mesmo como único aglomerante. Em alguns países em que existe deficiência na produção de gesso natural esta prática já é aplicada (OLIVEIRA, 2014).

Na área de pavimentação, o resíduo pode ser utilizado na aplicação de bases, sub-bases e aterros rodoviários. Com a vantagem, do ponto de vista ambiental, de utilizar grandes quantidades do resíduo (OLIVEIRA, 2005).

Na construção civil, placas, painéis, tijolos e ladrilhos podem ser confeccionados a partir desse material. Na indústria cimenteira, o fosfogesso é utilizado como retardador de pega (OLIVEIRA, 2005). Porém, para ser viável sua aplicação no cimento, o fosfogesso necessita de um índice de acidez superior a 4 e um teor de ácido fosfórico ( $P_2O_5$ ) menor que 0,8% (CANUT, 2006).

Estudando o comportamento de misturas contendo somente gesso e outras com substituição por fosfogesso, Canut (2006) afirma que por serem semelhantes, é viável o uso fosfogesso beneficiado como matéria prima a ser utilizada na fabricação, por exemplo: de peças pré-moldadas; blocos de alvenaria; divisórias; painéis acartonados e placas de rebaixo de teto.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo das alterações químicas no resíduo fosfogesso após beneficiamento térmico. Para tal, foi feito um estudo comparativo entre as características químicas do fosfogesso *in natura*, do gesso da construção civil e do fosfogesso após aquecimento em diferentes temperaturas, visando definir a temperatura de beneficiamento adequada para utilização do fosfogesso como substituto do gesso de construção. A seguir, serão descritos os materiais utilizados e os métodos de ensaio que foram realizados.

#### 3.1 MATERIAIS

Na realização do estudo, foi utilizado o Qualigesso 30, um gesso comercial de pega rápida e um fosfogesso retirado dos depósitos de uma empresa produtora de fertilizantes, na cidade de Cajati, estado de São Paulo, sendo esse analisado *in natura* e após beneficiamento térmico. É interessante destacar que estes depósitos de fosfogesso se encontram na região dos centros consumidores de gesso.

Logo após o recebimento do fosfogesso foi feita uma secagem prévia a 50°C durante 24 horas em estufa, temperatura recomendada para eliminação do excesso de umidade da gipsita (BALTAR; BASTOS; LUZ, 2005). Em seguida, o material foi destorroado com auxílio de almofariz cerâmico, peneirado em peneira de 1,2 mm para eliminação das partículas com granulometria superior, e colocado em sacos plásticos para evitar a umidade, o procedimento está ilustrado na Figura 4. Após esse processo, o fosfogesso foi denominado *in natura*. O fosfogesso beneficiado é assim chamado o fosfogesso *in natura* após beneficiamento térmico.

**Figura 4 - Procedimento de destorroamento e peneiramento do fosfogesso**



Fonte: Autoria própria (2017)

Para a definição das temperaturas de beneficiamento foram realizados ensaios de análise térmica do fosfogesso diidratado (*in natura*) e do gesso comercial. Também foram realizados ensaios de difração de raios X para identificação dos compostos presentes em cada material. O ensaio de fluorescência de raios X foi realizado com o fosfogesso *in natura* a fim de identificar os elementos químicos que o compõem.

Após análise dos resultados obtidos com os ensaios, foram determinadas três temperaturas de beneficiamento: 150°C, 300°C e 600°C. Para cada temperatura foram separadas porções de 100 g de ambos gesso e fosfogesso *in natura* em cadinhos de porcelana e aquecidos durante seis horas, resultando em seis amostras: três de fosfogesso e três de gesso. Os materiais foram pesados antes e depois para verificar a perda de massa após o aquecimento. Para a temperatura de 150°C a perda de massa do gesso foi de 3,9%, enquanto o fosfogesso apresentou perda de 16,1%, a 300°C o gesso perdeu 3,2% de massa, e o fosfogesso 14,1%. A 600°C os recipientes partiram-se devido a alta temperatura, não sendo possível medir a perda de massa.

O equipamento utilizado para o aquecimento foi o forno tipo mufla da marca Fornitec modelo F3 - DM/T Trifásico, 220 V, temperatura máxima de 1200°C, 6000

W, 18 A e câmara útil de 20x20x40cm. O procedimento de aquecimento dos materiais na mufla é demonstrado na Figura 5.

**Figura 5 - Aquecimento dos materiais na mufla**



Fonte: Autoria própria (2017)

As amostras foram separadas em recipientes próprios e identificadas, e encaminhadas para ensaios de difração de raios X, para a identificação dos componentes formados em cada temperatura de beneficiamento.

## 3.2 MÉTODOS DE ENSAIO

### 3.2.1 ANÁLISES TÉRMICAS (TG/DSC)

A termogravimetria (TG) foi realizada para medir com exatidão a temperatura na qual ocorre a transformação do fosfogesso diidrato em hemidrato. O ensaio

consiste em aquecer uma amostra com massa pré-estabelecida e medir a variação de massa desta até a temperatura de 1000°C. Os resultados são expressos por curvas de variação de massa em função da temperatura, evidenciando os degraus de perda de massa (IONASHIRO, 2005).

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) mede a variação do calor em função da temperatura, e permite determinar transformações químicas e físicas (CINCOTTO, 2010).

Para a realização deste ensaio, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análise Térmica da Central de Análises da UTFPR Câmpus Pato Branco. As análises de TG foram realizadas em balança termogravimétrica TA Instruments modelo SDT Q-600, adotando atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 5°C min<sup>-1</sup>, massa de amostra igual a 1 g e cadinho de alumina. Os ensaios de DSC utilizaram o calorímetro de varredura diferencial da TA Instruments, modelo DSC Q-20, adotando atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 5°C min<sup>-1</sup>, massa de amostra igual a 1 g e cadinho aberto de alumínio.

### 3.2.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva que realiza medições qualitativas de amostras utilizando o princípio de medição de comprimento de ondas e intensidade das radiações emitidas pelos elementos (OLIVEIRA, 2014). Foi utilizada neste trabalho com o intuito de determinar a composição química das amostras de gesso e fosfogesso analisadas, e eventuais impurezas presentes.

A técnica utilizada nos ensaios foi a de espectroscopia por dispersão de energia de fluorescência de raios X (EDXRF). O equipamento utilizado foi do Laboratório de Física Nuclear Aplicada da UTFPR, marca Ampekt, composto pelo kit com dois tubos de raios X, modelo MINI X, um com alvo de prata (Ag) e outro de ouro (Au), e dois detectores do tipo silicodrift, modelo SDD-123, com janela de berílio.

Para obter um resultado mais preciso, considerando que o fosfogesso não é um material homogêneo, foram preparadas cinco amostras em recipientes cilíndricos de 2,7 cm de diâmetro (porta amostra), umedecidos com EDTA e compactados

manualmente (Figura 6). Para o gesso foram analisadas apenas três amostras, pois duas se desprenderam do recipiente durante as medidas. Após secas, as amostras foram medidas com a técnica EDXRF.

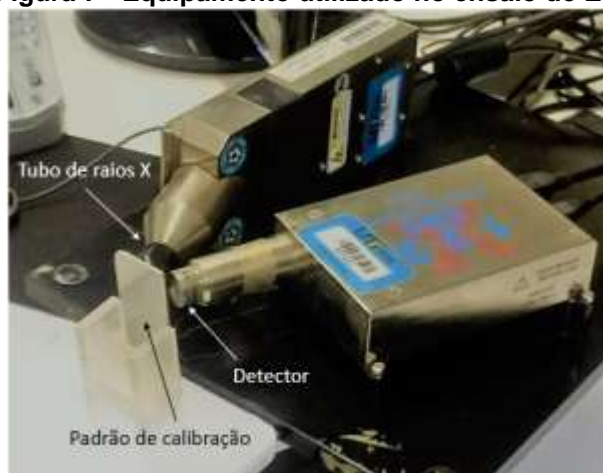
**Figura 6 - Amostras para medição com EDXRF**



Fonte: Laboratório de Física Nuclear Aplicada – UTFPR (2017)

Para as medidas realizadas com EDXRF foi utilizada a seguinte calibração: Foi usado o tubo com alvo de ouro (Au); tensão de 30 kv, corrente de 30  $\mu$ A; distância (tubo-detector-amostra): 1 cm; colimador de alumínio: 1 mm; tempo de exposição: 200 s (Figura 7).

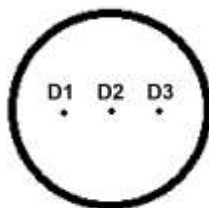
**Figura 7 - Equipamento utilizado no ensaio de EDXRF**



Fonte: Laboratório de Física Nuclear Aplicada – UTFPR (2017)

As medições foram feitas em três pontos distintos, como indicado na Figura 8. A partir do lado esquerdo o ponto D1 está a 0,85 cm, o ponto D2 está no centro (1,35 cm) e o ponto D3 está a 1,85 cm.

**Figura 8 - Pontos utilizados na medição**



Fonte: Laboratório de Física Nuclear Aplicada – UTFPR (2017)

Medidas de cada porta amostra e de cada amostra de fosfogesso: tensão de 40 kv, corrente de 10  $\mu$ A; distância (tubo-detector- amostra): 1 cm; colimador de alumínio: 1 mm; Tempo de exposição: 300 s.

### 3.2.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Esta técnica qualitativa foi realizada para identificar os principais compostos cristalinos presentes no gesso e fosfogesso. Com base nos difratogramas foi possível estabelecer um comparativo entre os compostos existentes do fosfogesso *in natura* e beneficiado, indicando as alterações ocorridas nestes quando submetidos a diferentes temperaturas na mufla para o fosfogesso, e do gesso de construção.

A caracterização química dos materiais por difratometria de raios X foi realizada pelo laboratório do Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais da UTFPR, utilizando o difratômetro de raios-x de marca Shimadzu XRD-7000.

Os parâmetros adotados para o ensaio foram passo angular = 0,02 graus;  $2\theta$  e tempo de passo de 10 segundos.

### 3.2.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com o objetivo de verificar o ganho de resistência do fosfogesso após o beneficiamento, assim como comparar os resultados com os do gesso comercial.

Para a obtenção do fosfogesso beneficiado foi aquecido aproximadamente 1,6 kg a 150°C durante seis horas, temperatura e tempo que foram aquecidas as amostras que apresentaram espectros de difratometria semelhantes ao do gesso. O fosfogesso *in natura* foi distribuído em três recipientes em estufa do tipo mufla. Os recipientes foram pesados antes e após o aquecimento para a verificação da perda de massa.

Pelo fato de os laboratórios utilizados não possuírem equipamento específico para os ensaios descritos na norma de gesso foi utilizada a metodologia dos ensaios para argamassa de cimento, adaptada para o gesso. Sendo assim, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, de cada material, fosfogesso *in natura*, fosfogesso beneficiado e gesso comercial. Os corpos de prova foram confeccionados com pasta produzida utilizando os materiais e água.

Primeiramente foi adotada a relação água/gesso de 0,5 para o gesso e o fosfogesso beneficiado na tentativa de se obter corpos de prova de maior resistência, porém ao confeccionar a pasta de fosfogesso o resultado foi uma massa seca de baixa trabalhabilidade e rápido endurecimento, impossibilitando a moldagem. Foi então adotada a relação água/gesso de 0,6, que resultou em uma pasta adequada para a moldagem dos corpos de prova. Para a pasta de fosfogesso *in natura* utilizou-se a relação água/fosfogesso de 0,5, como forma de compensar a água presente no diidrato.

Após 7 dias da moldagem foi observada corrosão nos moldes para as pastas de gesso (Figura 9) e fosfogesso beneficiado (Figura 10), sendo neste mais intensa. A corrosão fez com que os corpos de prova grudassem nos moldes, o que dificultou a desmoldagem e resultou em inutilização de três corpos de prova de fosfogesso beneficiado. A pasta de fosfogesso *in natura* apresentou vazamento de água nos moldes, resultando em retração dos corpos de prova, como observado na Figura 11.



**Figura 9 – Corrosão no molde de gesso**



Fonte: Autoria própria (2017)

**Figura 10 – Corrosão no molde de fosfogesso beneficiado**



Fonte: Autoria própria (2017)

**Figura 11 – Retração no corpo de prova de fosfogesso *in natura***



Fonte: Autoria própria (2017)

O equipamento utilizado para os ensaios foi a prensa da marca Emic, modelo DL30000N dos Laboratórios da Área de Materiais da UTFPR campus Ecoville. Foram realizados apenas ensaios de compressão axial.

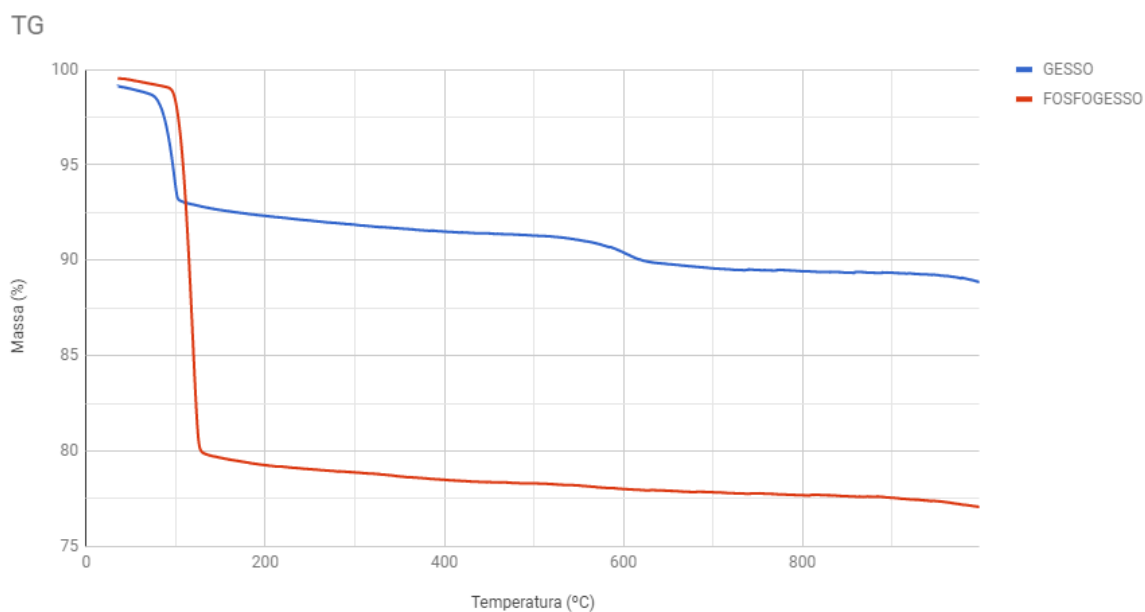
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de realizar um estudo comparativo, serão apresentados e analisados resultados de ensaios realizados em outros trabalhos.

### 4.1 ANÁLISES TÉRMICAS

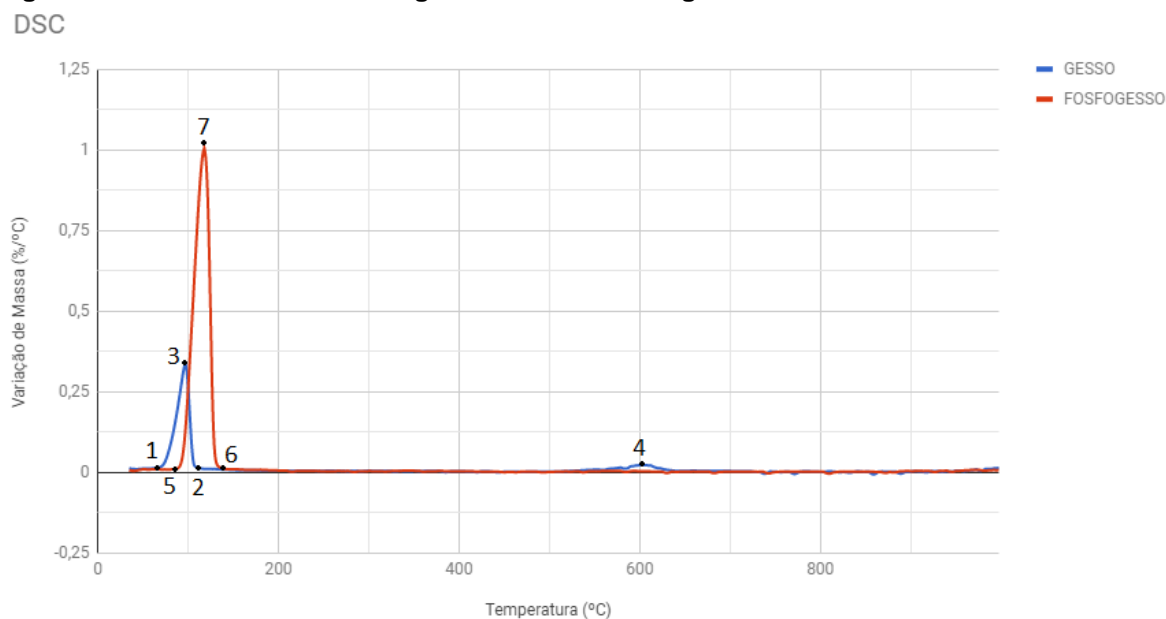
No presente trabalho foram realizadas as análises de TG e DSC com o fosfogesso *in natura* e o gesso comercial. As análises estão apresentadas nas Figuras 12 e 13 para a TG e o DSC, respectivamente.

**Figura 12 - Curvas TG do fosfogesso *in natura* e do gesso comercial**



Fonte: Autoria própria (2017)

**Figura 13 - Curvas DSC do fosfogesso *in natura* e do gesso comercial**



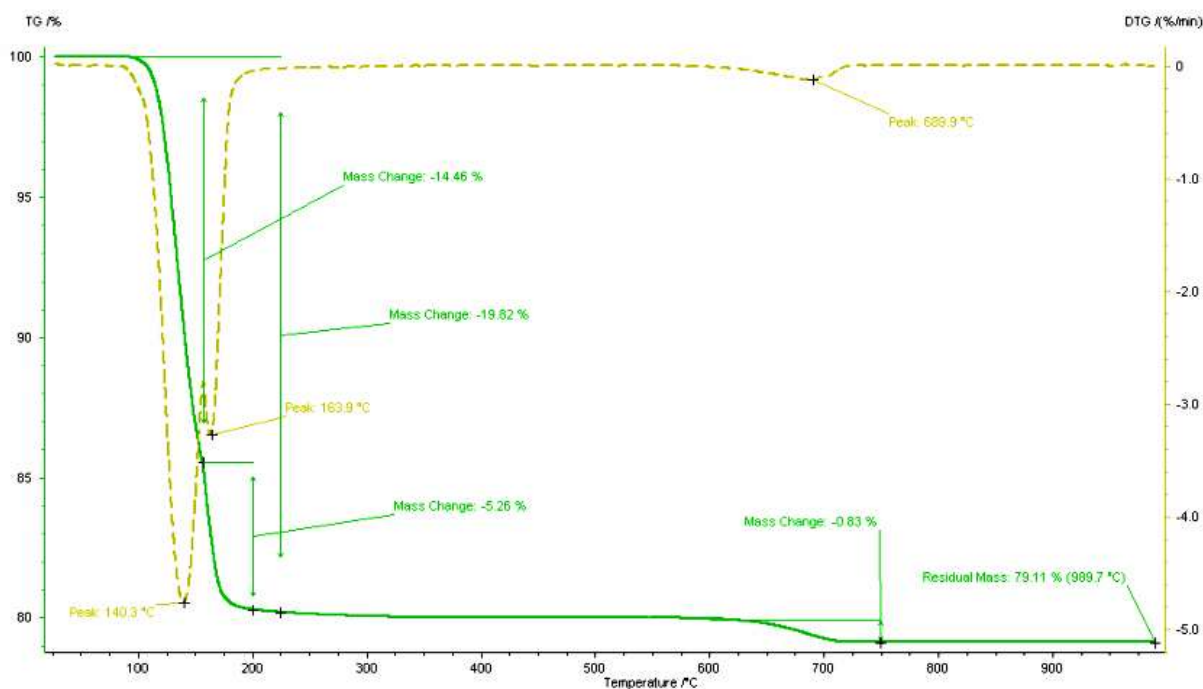
Fonte: Autoria própria (2017)

Na curva DSC do gesso se identificam quatro pontos, o ponto 1 indica o início de perda de massa a 72,7°C e o ponto 2 indica seu fim a 106,8°C, tendo seu pico em 97,1°C no ponto 3, correspondendo a perda de água do hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ). O ponto 4 representa um pico menor, da descarbonatação da dolomita ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) a 601,1°C. Analisando sua curva TG observa-se que a perda de massa durante o primeiro intervalo foi de aproximadamente 7%.

No fosfogesso, a curva DSC indica no ponto 5 o início de perda de massa a 92,3°C com o término da perda de massa a 134,4°C no ponto 6, com o pico a 117,7°C no ponto 7. Pode-se verificar a perda de cerca de 20% de massa durante este intervalo ao analisar a sua curva TG. Essa perda de água corresponde ao diidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Uma análise térmica de uma gipsita está representada na Figura 14, apresentada por Cincotto (2010). Analisando a curva de termogravimetria diferencial (DTG), verifica-se a presença de dois picos: um pico a 140,3°C de perda de 1,5 mols de água, formando o hemidrato, e outro a 163,9°C de perda de 0,5 mol de água, formando a anidrita. Durante esses picos, a curva de Termogravimetria (TG) aponta uma perda de massa de aproximadamente 20%. Ainda pode-se identificar um pico a 689,9 °C de descarbonatação do carbonato de cálcio, com menor perda de massa.

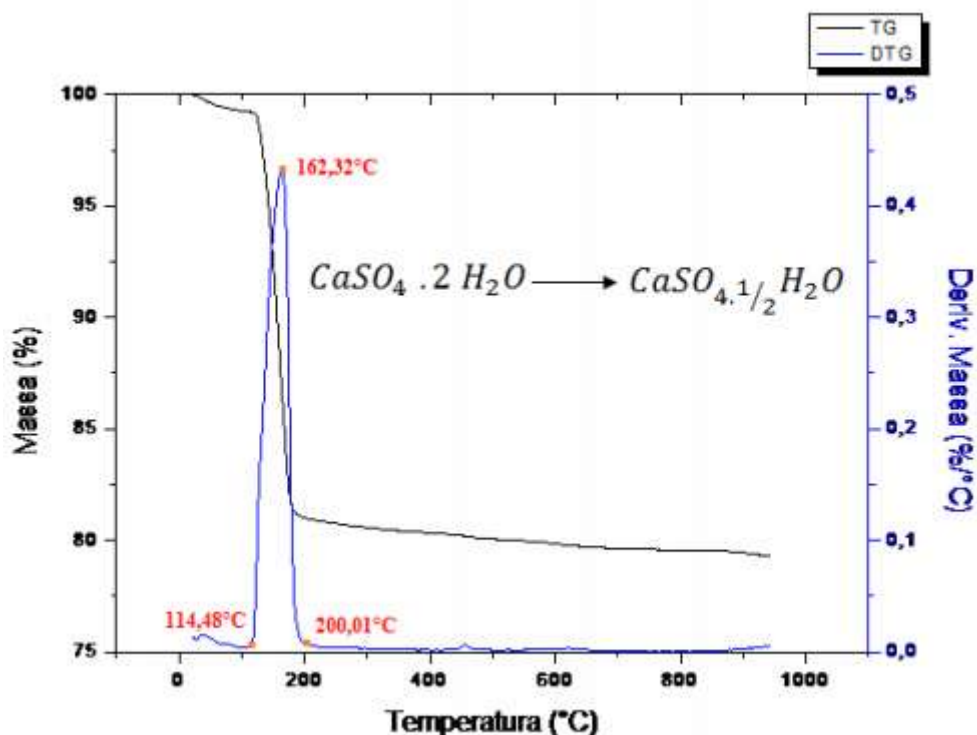
Figura 14 - Curvas TG e DTG da gipsita



Fonte: Cincotto (2010)

Em seu estudo, Gomes (2012) realizou uma análise térmica da gipsita residual resultante do processo de produção do sal (carago), apresentada na Figura 15. Verificou-se que a perda de massa se inicia a 114,48°C e termina a 200,01°C, tendo seu máximo em 162,32°C, com aproximadamente 20% de perda de massa. Em ensaios posteriores foi constatado que a temperatura de 160°C se mostrou suficiente para formar o hemidrato beta.

Figura 15 - Curvas TG e DTG da gipsita (carago)

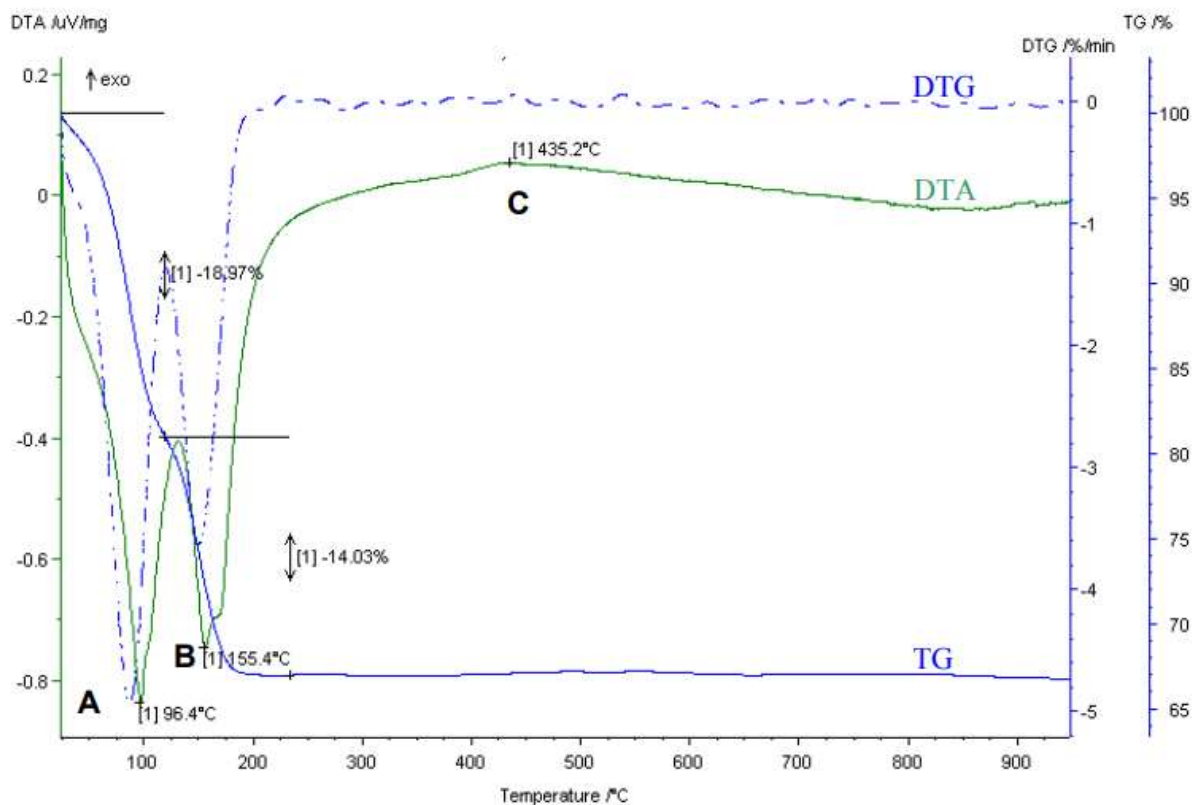


Fonte: Gomes (2012)

Canut (2006) realizou uma análise térmica de um fosfogesso (Figura 16) e a de um gesso (Figura 17). No fosfogesso, o primeiro pico corresponde à perda de água livre na temperatura de 96,4°C (“A”), enquanto o pico “B” (155,4°C) corresponde à perda de água estrutural. O pico “C” (435,2°C) se dá devido a transformação da anidrita solúvel (anidrita III) em insolúvel (anidrita II). É possível identificar uma perda de massa de cerca de 33%. Para este fosfogesso, a temperatura adotada de 180°C foi adequada para o beneficiamento térmico.

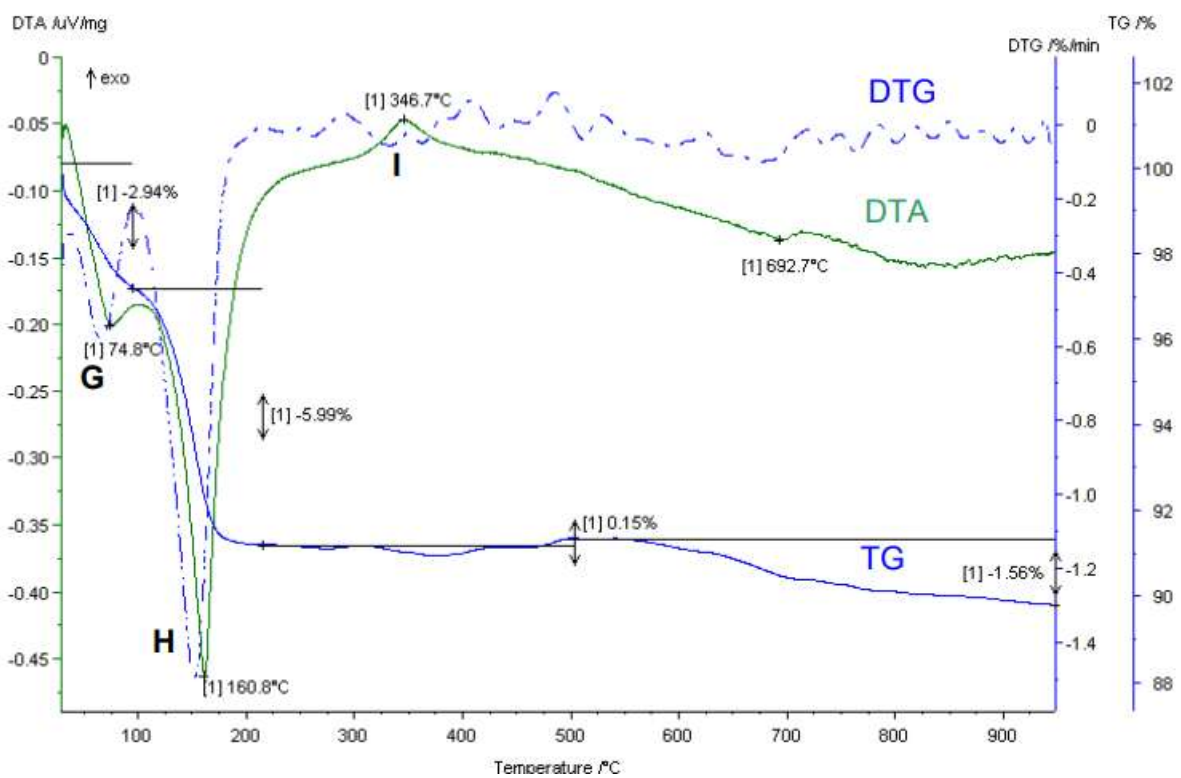


Figura 16 - Análise térmica do fosfogesso (Canut)



Fonte: Canut (2006)

Figura 17 - Análise térmica do gesso (Canut)



Fonte: Canut (2006)

Na análise térmica do gesso foram identificados picos de perda de massa a 74,8°C e 160,8°C. O pico a 435,2°C é resultado da formação de anidrita II. A perda de massa na amostra foi de aproximadamente 8,8%.

Comparando as análises térmicas observa-se que a perda de massa do fosfogesso analisado foi similar às análises de gipsita e a perda ocorreu em faixas próximas de temperatura. A análise térmica do fosfogesso foi essencial para a escolha das temperaturas aplicadas no seu aquecimento pois permitiu identificar a temperatura em que ocorre a desidratação do sulfato de cálcio diidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) obtendo-se a bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ).

#### 4.2 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Analisando os elementos encontrados através do ensaio de fluorescência de raios X para as amostras de fosfogesso e gesso apresentados na Tabela 4, pode-se observar que, assim como esperado, possuem basicamente a mesma composição de elementos, sendo principalmente constituídos de cálcio (Ca), enxofre (S) e oxigênio (O) que são os elementos formadores do sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ). Comparando o fosfogesso analisado no presente trabalho com o analisado por Canut (2006) percebe-se que a diferença entre os fosfogessos se encontra nos elementos traços, os elementos Al, Mg, Fe, Ce, Ti e Sr aparecem em ambos, enquanto Si, Cl, Na, Ni, La, Nd, K, Cu, Zr e Pr estão presentes em apenas um dos fosfogessos.

O elemento fósforo (P) se apresenta em baixa incidência no fosfogesso, resultando da sua condição de elemento residual no processo de produção do fertilizante fosfatado.



**Tabela 4 – Comparação entre elementos presentes em amostras de gesso e fosfogesso**

Amostras	Elementos	Elementos Traços
Fosfogesso <i>in natura</i>	S, O, Ca, P	Al, Mg, Cl, Fe, Ce, Ti, Ni, Nd, Cu, Sr
Gesso Comercial	S, O, Ca	Si, Al, Mg, Cl, Ni, Fe, Mn, Sr
Fosfogesso Canut (2006)	S, O, Ca, P	Si, Al, Mg, Na, Fe, Ce, Ti, La, K, Sr, Zr, Pr
Gesso Canut (2006)	S, O, Ca	Si, Al, Mg, K, Zn, Cu, Fe, Mn, Sr

Fonte: Autoria própria (2017)

### 4.3 DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Uma análise mineralógica do gesso e fosfogesso pode ser feita através da difração de raios X. Nas Tabelas 5 e 6 estão apresentados os compostos identificados nos espectros de difração do gesso e fosfogesso respectivamente, junto com suas identificações.

**Tabela 5 – Compostos identificados no ensaio de difratometria de raios X do gesso**

ICDD	Nome do composto	Fórmula Química	Identificação
41-0224	Bassanita	CaSO <sub>4</sub> .0,5H <sub>2</sub> O	B
11-0078	Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	D
05-0586	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	C
23-0128	Anidrita Solúvel	CaSO <sub>4</sub> .0,15H <sub>2</sub> O	As
37-1496	Anidrita Insolúvel	CaSO <sub>4</sub>	Ai

Fonte: Autoria própria (2017)

**Tabela 6 – Compostos identificados no ensaio de difratometria de raios X do fosfogesso**

ICDD	Nome do composto	Fórmula Química	Identificação
33-0311	Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	G
41-0224	Bassanita	CaSO <sub>4</sub> .0,5H <sub>2</sub> O	B
29-0359	Fosfato de Cálcio	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	F
25-0378	Ácido Fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Af
10-0423	Berlinita	AlPO <sub>4</sub>	Be
23-0128	Anidrita Solúvel	CaSO <sub>4</sub> .0,15H <sub>2</sub> O	As
37-1496	Anidrita Insolúvel	CaSO <sub>4</sub>	Ai

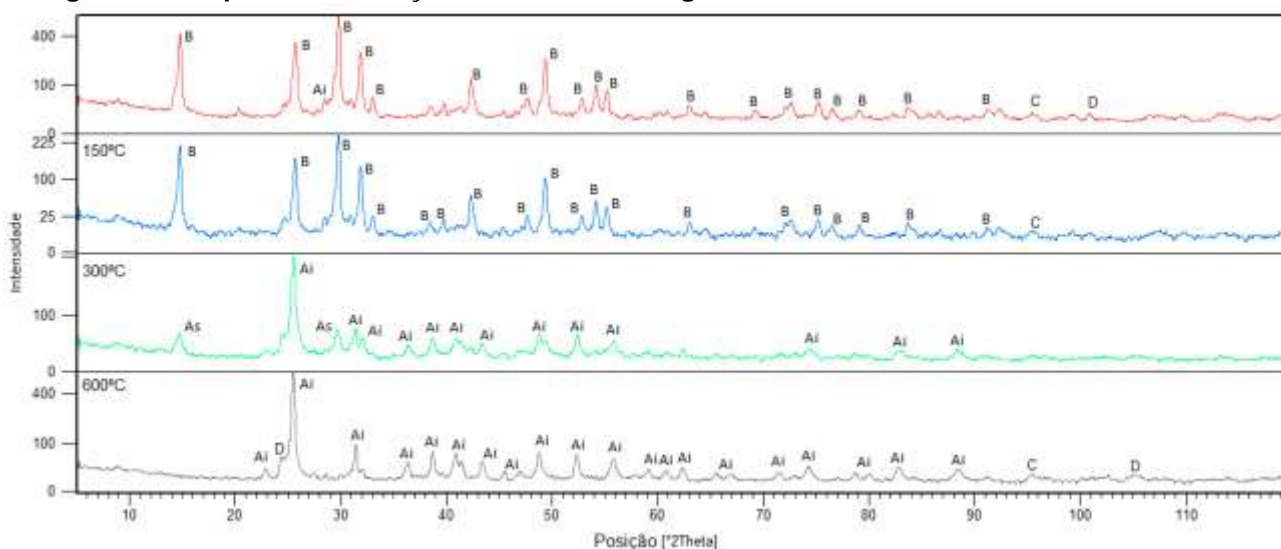
Fonte: Autoria própria (2017)

Os espectros de difração das amostras do gesso comercial em diferentes temperaturas estão apresentados na Figura 18, enquanto na Figura 19 apresenta-se os resultados para o fosfogesso, tanto *in natura* quanto para as amostras aquecidas.

Os picos bem definidos dos minerais observados nos espectros são originados devido à presença de fases cristalinas em ambos gesso e fosfogesso. Na amostra de gesso pode-se observar os picos de bassanita no material antes de ser aquecido e ao ser aquecido a 150°C, não alterando sua composição. Ao ser aquecido a 300°C verifica-se predominância do composto anidrita insolúvel, ainda mais presente na temperatura de 600°C. Foi possível identificar compostos além do sulfato de cálcio, como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), como foi evidenciado nas análises térmicas.

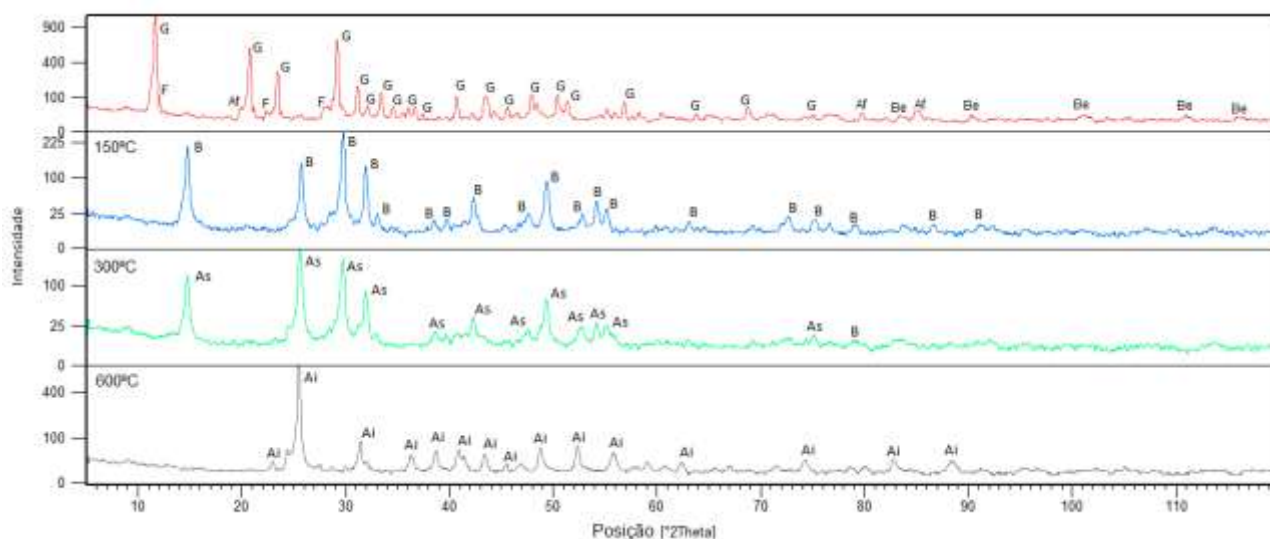
No fosfogesso *in natura* é clara a predominância da gipsita em sua composição, porém quando aquecido a 150°C demonstra picos de bassanita, anidrita solúvel a 300°C e anidrita insolúvel a 600°C. A presença de compostos contendo fósforo evidencia a natureza do fosfogesso, inclusive sendo identificado o ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), produto final do processo de produção de fertilizantes.

**Figura 18 - Espectro de difração das amostras de gesso comercial**



Fonte: Autoria própria (2017)

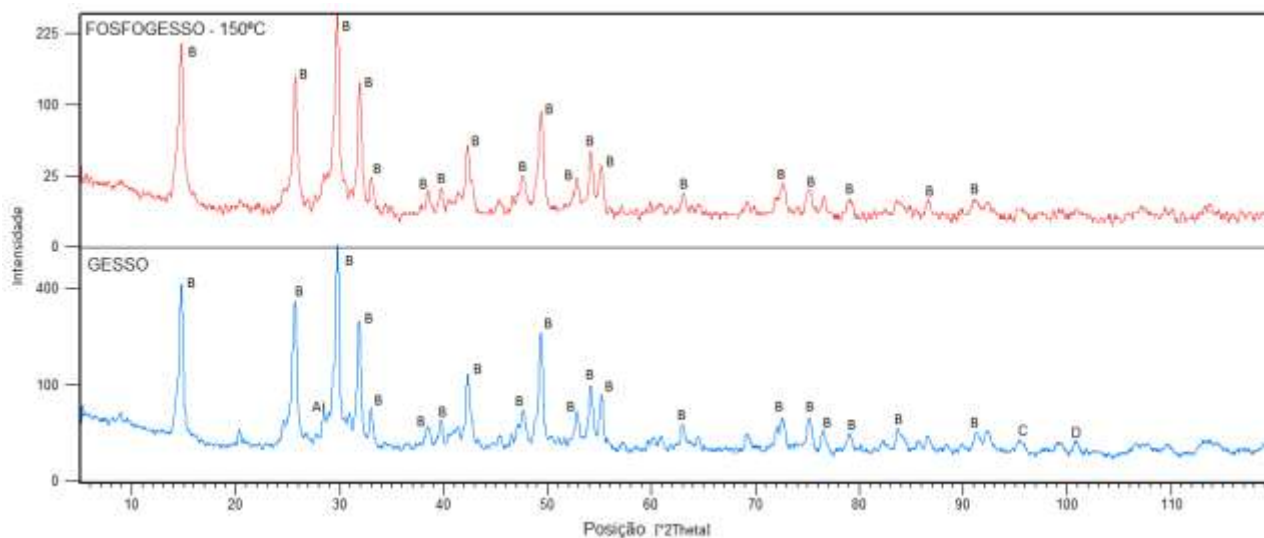
**Figura 19 - Espectro de difração das amostras de fosfogesso**



Fonte: Autoria própria (2017)

Na Figura 20 pode-se observar mais claramente a coincidência entre os picos de bassanita do gesso comercial e do fosfogesso beneficiado termicamente a 150°C. Como previsto na análise térmica, esta temperatura foi suficiente para a mudança de fase da gipsita, obtendo a bassanita, que é o objetivo do beneficiamento.

**Figura 20 - Comparação dos espectros de difração das amostras de gesso e fosfogesso beneficiado**



Fonte: Autoria própria (2017)

#### 4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Nas pastas confeccionadas para a moldagem dos corpos de prova pode-se observar que a pasta de fosfogesso beneficiado com uma relação água/gesso de 0,6 resultou em uma pasta com boa trabalhabilidade e coesão, enquanto que a pasta de fosfogesso *in natura* com relação água/fosfogesso de 0,5 apresentou baixa trabalhabilidade e coesão. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resistência à compressão axial**

Corpos de Prova	Tensão (MPa)		
	Fosfogesso <i>in natura</i>	Fosfogesso Beneficiado	Gesso Comercial
CP1	0,09	0,05	4,68
CP2	0,09	0,36	4,57
CP3	0,09	0,30	4,66
CP4	0,08	-	4,16
CP5	0,09	-	4,28
CP6	0,07	-	4,47
<b>Média</b>	<b>0,085</b>	<b>0,237</b>	<b>4,47</b>

Fonte: Autoria própria (2017).

Apesar de ter apresentado uma média de resistência aproximadamente 2,8 vezes maior que a do fosfogesso *in natura*, os corpos de prova de fosfogesso beneficiado ainda apresentaram uma resistência muito inferior à do gesso comercial, sendo cerca de 19 vezes menor. Durante o processo de aquecimento do fosfogesso, este apresentou uma perda de massa de 7,9%.

## 5 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, que focou a análise das alterações químicas do fosfogesso visando seu beneficiamento e comparação com o gesso da construção civil, foi possível extrair informações importantes sobre o fosfogesso, as quais são apresentadas no presente capítulo.

Foi possível observar por meio das análises térmicas das amostras (TG e DSC) a influência da temperatura de beneficiamento. Verificou-se as temperaturas de transformação dos compostos presentes no gesso e fosfogesso, possibilitando estabelecer a temperatura de beneficiamento para obtenção de hemidrato a partir do sulfato de cálcio diidratado presente no fosfogesso (150°C).

Através de ensaios de difração de raios X e fluorescência de raios X pode-se caracterizar os materiais quimicamente e realizar um estudo comparativo. A composição de elementos químicos do fosfogesso é similar a do gesso de construção civil, sendo o fósforo presente no fosfogesso o elemento que mais difere. O fosfogesso apresentou baixos teores de impurezas, porém o fósforo possivelmente poderá alterar algumas propriedades.

Na análise do espectros de difratometria de raios X o fosfogesso beneficiado a 150°C apresentou mineralogia semelhante ao do gesso de construção civil, caracterizada por forte presença do mineral sulfato de cálcio hemidratado (bassanita). Para as temperaturas mais altas foi observada presença marcante da anidrita no gesso e fosfogesso, confirmando os resultados da análise térmica.

Comparando os resultados deste trabalho com trabalhos realizados anteriormente verificou-se que os resultados foram condizentes, nas análises térmicas e caracterização química.

Um dos fatores que pode ter influenciado para que os corpos de prova de fosfogesso beneficiado apresentaram resistência muito menor do que os confeccionados de gesso comercial foi o tempo de aquecimento do fosfogesso, que pode não ter sido suficiente para a desidratação de todo o material, a interferência de algum dos elementos químicos presentes alterando as reações de hidratação e a idade de avaliação. A perda de massa pode ser utilizada como um indicador neste caso, sendo inferior no beneficiamento do material para os ensaios mecânicos do que a observada na amostra utilizada na difratometria de raios X.

Conclue-se que o processo de beneficiamento do fosfogesso para seu uso como gesso da construção civil se demonstrou essencial, sendo que apenas após seu aquecimento em temperatura adequada que o material adquire as características químicas compatíveis com as do gesso. Porém o material sozinho não apresentou propriedades mecânicas suficientes para seu uso isolado, sendo mais apropriada a utilização de composições feitas de gesso em conjunto com o fosfogesso beneficiado, pesquisas adicionais devem ser feitas nesse sentido. Além disso, para seu uso na construção civil, deve ser feito antes uma análise radiológica do fosfogesso, verificando se o material se enquadra dentro das normas atuais e determinando a proporção a ser utilizada junto com o gesso.

## 5.1 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

O presente trabalho evidenciou a necessidade de estudos posteriores que auxiliem na aplicação do resíduo fosfogesso na construção civil. Como sugestão propõe-se:

- Estudo da influência do tempo de permanência em temperatura de beneficiamento do fosfogesso nas suas propriedades físicas e químicas.
- Produção de pastas compostas de gesso comercial e fosfogesso beneficiado termicamente em diferentes proporções, analisando suas propriedades com base nas normas para gesso de construção civil.
- Análise da produção de pastas contendo fosfogesso com a utilização de aditivos plastificantes, com o intuito de aumentar sua resistência.
- Estudo do impacto ambiental proporcionado pela deposição do fosfogesso em pilhas de armazenamento.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 13207**: Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 1994.

ALVES, K. C. S. K. **Estudo do fosfogesso tratado termicamente e de suas misturas com solo tropical**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2015.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Diagnóstico do Pólo Gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para a fabricação de cimento**. 2003.

\_\_\_\_\_. **Gipsita, Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. p. 449 - 470. CETEM. Rio de Janeiro, 2005.

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

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

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). **Resolução CNEN 179/14 – Uso do fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira**. Publicação: DOU 10.12.2014. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução CNEN 189/15 – Nível de dispensa para o uso do fosfogesso na construção civil**. Publicação: DOU 13.08.2015. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2015.

CINCOTTO, M. A. **PCC 5042 – Aglomerantes de Argamassas e Concretos, Cap. 2. Análise térmica dos ligantes e seus materiais**. POLI – Universidade de São Paulo. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 307 de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>> . Acesso em: outubro de 2016.

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



COSTA, M. G. et al. **A viabilidade do uso do fosfogesso como material de construção civil: utilização em larga escala em bloco de vedação**. V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. Belo Horizonte, 2014.

DEGIRMENCI, N. **The Using of Waste Phosphogypsum and Natural Gypsum in Adobe Stabilisation**. Constr. Build. Materials., 22: 1220-1224. 2008a.

\_\_\_\_\_. **Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products**. Construction and Building Materials. Vol. 22, 2008, p.1857-1862 2008b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM), MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Sumário Mineral 2015**. Fosfato. 2015.

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

GOMES, M. F. **Otimização do tempo e temperatura no processamento da gipsita oriunda dos cristalizadores da produção de sal para obter gesso de uso na construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.

GREENPEACE INTERNATIONAL. **Ugly food: the truth behind chemical fertilisers in China**. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/en/news/Blogs/makingwaves/chemical-fertilisers-china/blog/44517/>>. Acesso em: outubro de 2016.

IONASHIRO, M. **Giolito: Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial/calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: Giz Editorial e Livraria Limitada, 2005.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Gesso de construção civil, Cap. 23. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Organizador/Editor ISAIA, Geraldo C. IBRACON. Universidade de São Paulo, 2010.

MATOS, T. H. C. **Caracterização Hidro-Mecânica do Fosfogesso e das Misturas Solo-Fosfogesso**. Dissertação de Mestrado. UNB. Brasília, 2011.

MAZZILLI, B. P. **Desafios tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso: A radioatividade do fosfogesso**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares. Laboratório de radiometria ambiental. São Paulo, 2005.

MELO, R. A. A.; SILVA, D. G. **Estudo da Viabilidade do Uso do Fosfogesso Como Matéria-Prima na Produção de Materiais Cerâmicos**. Revista e-xacta, v. 6 n. 2, p.13 -31, Belo Horizonte 2013.

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

OLIVEIRA, J. I. **Estudo do resíduo fosfogesso na formulação de uma pasta para revestimento interno de edifícios.** 2014. 125f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas de Fosfogesso e Cal para Utilização na Construção Rodoviária.** 2005. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Área de concentração: Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ORTIZ, J. A. **Estudo de Misturas de Solo e Fosfogesso com vistas a sua utilização em Rodovias.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 1997.

PAES, V.P. **Caracterização radioquímica do  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  e dos isótopos de urânio e tório no fosfogesso.** 2001. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

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

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

SANTOS, A.J.G. **Avaliação do impacto radiológico ambiental do fosfogesso brasileiro e lixiviação de  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$ .** 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2002.

SAUEIA, C. H. R. **Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção.** 1998. 82f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1998.

SILVA, R. M.; GIULIETTI, M. **Fosfogesso: geração, destino e desafios. Agrominerais para o Brasil.** CETEM/MCT. Rio de Janeiro. Brasil, 2010.

SILVA, H. V.; MORAES JR, D.; SANTOS A. R.,. **Pesquisa do fosfogesso como isolante térmico utilizado na indústria.** UNISANTA - Science and Technology, v. 1 n. 1, p.7 -13, 2012.

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

WISSA, A. E. Z.; FULEIHAN, J. F. **Control of groundwater contamination from phosphogypsum disposal sites.** Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum, Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, 1980.