

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO FOSFOGESSO**  
**COMPARATIVAMENTE A ALGUMAS PROPRIEDADES DO GESSO**  
**MINERAL**

**João Ailton Brondino**

São Carlos  
2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO FOSFOGESSO**  
**COMPARATIVAMENTE A ALGUMAS PROPRIEDADES DO GESSO**  
**MINERAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

**Área de Concentração:** Sistemas Construtivos

**Linha de Pesquisa:** Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade na Construção Civil

**Orientador:** Prof. Dr. Almir Sales

São Carlos  
2014

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

B869ce

Brondino, João Ailton.

Contribuição ao estudo do fosfogesso comparativamente a algumas propriedades do gesso mineral / João Ailton Brondino. -- São Carlos : UFSCar, 2015.  
109 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Construção civil. 2. Gesso agrícola. 3. Ácido fosfórico.  
4. Alvenaria. 5. Vedação (tecnologia). 6. Passivo ambiental.  
I. Título.

CDD: 690 (20<sup>a</sup>)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil  
Rod. Washington Luís, Km 235  
13565-905 – São Carlos – SP  
Fone: (16) 3351-8261 Fax (16) 3351-8262  
e-mail: [ppgeciv@ufscar.br](mailto:ppgeciv@ufscar.br) site: [www.ppgeciv.ufscar.br](http://www.ppgeciv.ufscar.br)

**JOÃO AILTON BRONDINO**

**Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em dezesseis de junho de 2014.**

**Banca Examinadora constituída pelos membros:**

**Prof. Dr. Almir Sales**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar  
**Orientador**

**Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos**  
Instituto de Arquitetura e Urbanismo/IAU/USP  
**Examinador Externo**

**Prof. Dr. José da Costa Marques Neto**  
Departamento de Engenharia Civil/PPGECiv/UFSCar  
**Examinador Interno**

*A Deus, fonte de misericórdia, em quem sempre posso confiar.*

*Aos meus pais, Armelindo Brondino (in memoriam) e Delcides Ferrari Brondino, e à  
minha família, a quem dedico todo meu esforço e alegria em viver.*

## AGRADECIMENTOS

---

A Deus por abençoar e iluminar meu caminho;

À minha família pelo carinho e incentivo ao longo de todas as conquistas de minha vida;

Ao meu orientador Prof. Dr. Almir Sales, pela disposição na orientação deste trabalho e pela amizade construída durante o período de pesquisa;

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Celso Aparecido Martins, do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, por suas considerações no exame de qualificação e que contribuíram sobremaneira para a execução desta dissertação;

Ao Prof. Dr. José da Costa Marques Neto, do Departamento de Engenharia Civil da UFSCar, também por suas considerações no exame de qualificação desta dissertação;

Aos professores, técnicos, funcionários e colegas do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PPGECiv) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), do Laboratório LIEC (DQ/UFSCar), dos Laboratórios LMC e LSE (DECiv/UFSCar), que direta ou indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho;

Aos colegas Paulo de Carvalho Dias Mendes, do Programa de Pós-Graduação em Química da UFSCar, e Eric Felipe Gonçalves, graduando em Engenharia Civil da UFSCar, pela grande colaboração;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio à pesquisa através de bolsa de Mestrado;

À empresa Vale Fertilizantes de Uberaba pelo fornecimento do material necessário ao desenvolvimento desta pesquisa;

À empresa KAJ - Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. por ter disponibilizado imagens e seu laboratório para o desenvolvimento desta dissertação.

*“O que é o homem sem os animais? Se todos os animais se fossem o homem morreria de uma grande solidão de espírito. Pois o que ocorre com os animais, breve acontece com o homem. Há uma ligação em tudo.*

*Vocês devem ensinar às suas crianças que o solo a seus pés é a cinza de nossos avós. Para que respeitem a terra, digam a seus filhos que ela foi enriquecida com as vidas de nosso povo. Ensinem as suas crianças o que ensinamos as nossas, que a terra é nossa mãe. Tudo o que acontecer à terra, acontecerá aos filhos da terra. Se os homens cospem no solo, estão cuspiendo em si mesmos.*

*Isto sabemos: a terra não pertence ao homem; o homem pertence à terra. Isto sabemos: todas as coisas estão ligadas como o sangue que une uma família.*

*Há uma ligação em tudo.*

*O que ocorrer com a terra recairá sobre os filhos da terra. O homem não tramou o tecido da vida; ele é simplesmente um de seus fios. Tudo o que fizer ao tecido, fará a si mesmo.”*

*(Extraído da carta do Chefe Seattle ao presidente Franklin Pierce)*

*“O desenvolvimento não pode ser contra a felicidade, tem que ser a favor da felicidade humana, do amor sobre a terra, nas relações humanas, no cuidar dos filhos, em ter amigos, em ter o mínimo necessário. Precisamente, porque esse é o tesouro mais importante que existe. Quando lutamos pelo meio ambiente, o primeiro elemento do meio ambiente se chama felicidade humana.”*

*(José Mujica)*

*“Pobre não é o que tem pouco, mas sim o que necessita infinitamente muito, e deseja, e deseja, mais e mais...”*

*(Lucius Annaeus Sêneca)*

*“O consumo desnecessário não é sustentável, é desumano!”*

*(João Ailton Brondino)*

BRONDINO, J. A. **Contribuição ao estudo do fosfogesso comparativamente a algumas propriedades do gesso mineral**. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, 2014.

O fosfogesso é um sulfato de cálcio (gesso químico), gerado como resíduo na produção industrial de ácido fosfórico, principal matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados. É gerado em grande escala, sendo que para produzir uma tonelada de ácido fosfórico são geradas muitas toneladas de fosfogesso, dependendo da composição da rocha fosfática utilizada. No Brasil são geradas anualmente milhões de toneladas e dispostas em aterros a céu aberto, sem destino adequado para o volume gerado, o que representa um grande passivo ambiental e que se agrava, progressivamente, com a necessidade do aumento da produção de alimentos. Assim, essa pesquisa teve como objetivo determinar uma relação entre a temperatura e o tempo de calcinação do fosfogesso para estudar a possibilidade de adequar a sua utilização na construção civil. Para isso, foram produzidas amostras de fosfogesso calcinado com diferentes combinações de temperatura e tempo, e que foram utilizadas na preparação dos corpos de prova. Estes foram avaliados em testes mecânicos (resistência à compressão e à tração na flexão) e físicos (absorção de água). A melhor combinação entre temperatura e tempo de calcinação foi 159°C e 120 minutos, resultados que expressaram as maiores resistências mecânicas à flexão e à compressão, e o índice de absorção de água atendeu às normas brasileiras adotadas nas recomendações para blocos de concreto e blocos cerâmicos. A contribuição científica deste trabalho será importante não só para a construção civil, mas para a sustentabilidade do planeta, pois um resíduo industrial que é gerado em grande quantidade, poderá se tornar matéria-prima para a confecção de elementos construtivos para edificações, evitará a necessidade de novos aterros controlados para a sua disposição e também, sempre que um resíduo industrial substitui uma matéria prima, é importante salientar que, além do uso do resíduo e eliminação de aterros, deixamos de prospectar a matéria prima substituída, prolongando a “vida útil” da mesma e/ou preservando áreas de exploração.

**Palavras-chave:** fosfogesso, ácido fosfórico, material alternativo para construção, alvenaria de vedação, passivo ambiental.



**BRONDINO, J. A. Contribuição ao estudo do fosfogesso comparativamente a algumas propriedades do gesso mineral.** 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, 2014.

The phosphogypsum is calcium sulfate (gypsum chemical), generated as waste in industrial production of phosphoric acid, the main raw material for the production of phosphate fertilizers. Is generated on a large scale, and to produce one ton of phosphoric acid are generated many tons of phosphogypsum, depending on the composition of the phosphate rock used. In Brazil are generated annually million tons and disposed in landfill or dumpsites sites without suitable destination for the volume generated, which represents a major environmental liability and worsens, progressively, with the need for increased food production. Thus, this research aimed to determine a relationship between temperature and phosphogypsum the calcination time, to study the possibility of adapting their use in construction. For this, calcined phosphogypsum samples were produced with different combinations of temperature and time, and, then were used in the preparation of the molded specimens. These were evaluated in mechanical tests (compressive strength and tensile strength in bending) and physical (water absorption). The best combination of temperature and calcination time was 159°C and 120 minutes, results that expressed the highest mechanical resistance to bending and compression, and the water absorption index met the Brazilian standards adopted in the recommendations for blocks concrete and blocks ceramic. The scientific contribution of this work will be important not only for building, but for the sustainability of the planet, because an industrial waste that is generated in large quantities, can become raw material for the production of building components for buildings, will avoid the need of new controlled landfill sites for its disposal and also, where an industrial residue replaces a raw material, it is noteworthy that, besides the use and eliminate waste landfills, we will stop exploring the raw material replaced, prolonging the "lifespan" the same and/or preserving of areas exploration.

Keywords: phosphogypsum, phosphoric acid, alternative material for construction, sealing masonry, environmental liability.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1.1 - Reservas mundiais de rochas fosfáticas.....	23
Figura 1.2 - Reservas de rochas fosfáticas em operação no Brasil .....	23
Figura 1.3 - Demanda, produção e importação de fósforo .....	25
Figura 1.4 - Produção nacional e importação de fertilizantes.....	25
Figura 1.5 - Curva de Crescimento Populacional Mundial.....	26
Figura 2.1 - Mineração de rochas fosfáticas em Ouvidor (GO) .....	31
Figura 2.2 - Mineração de rochas fosfáticas em Tapira (MG) .....	32
Figura 2.3 - Mineração de Rochas Fosfáticas em Cajati (SP).....	32
Figura 2.4 - Esquema da estrutura molecular espacial do ácido fosfórico .....	33
Figura 2.5 - Fluxograma da produção de ácido fosfórico por via úmida .....	35
Figura 2.6 - Esquema da estrutura molecular do sulfato de cálcio di-hidrato .....	36
Figura 2.7 - Esquema da estrutura molecular do sulfato de cálcio hemidrato .....	36
Figura 2.8 - Dose efetiva anual em fosfogesso de três procedências do Brasil .....	40
Figura 2.9 - Concentrações de radionuclídeos naturais em fosfogesso de três procedências do Brasil .....	42
Figura 2.10 – Espectro de difração das amostras de fosfogesso e gesso .....	44
Figura 2.11- Aplicação atual para o fosfogesso – gesso agrícola .....	45
Figura 2.12 - Aplicação atual para o fosfogesso – gesso agrícola .....	45
Figura 2.13 - Aterro de fosfogesso a céu aberto (Uberaba - Brasil) .....	46
Figura 2.14 - Aterro de fosfogesso a céu aberto (Florida- USA) .....	47
Figura 2.15 - Mistura do fosfogesso com a água do mar e bombeamento para o Oceano Atlântico (Marrocos).....	48
Figura 2.16 - Descarte de fosfogesso em aterros sanitários .....	48
Figura 2.17 - Descarte de fosfogesso em Uberaba – MG .....	49

Figura 2.18 - Lavra de gipsita no Pólo Gesseiro de Pernambuco (PE) .....	51
Figura 2.19 - Fragmento de rocha gipsita da região do Araripe (PE) .....	51
Figura 2.20 - Protótipo construído em São Carlos (SP) com placas de fosfogesso ..	58
Figura 2.21 – Resistência à compressão nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias .....	59
Figura 3.1 – Organograma dos procedimentos experimentais .....	61
Figura 3.2 - Fosfogesso coletado em Uberaba – MG .....	63
Figura 3.3 - Sequência do processo de desidratação do fosfogesso di-hidratado ....	64
Figura 3.4 - Sequência do processo de desaglomeração do fosfogesso hemidratado .....	65
Figura 3.5 - Sequência do processo de produção dos corpos de prova .....	67
Figura 3.6 - Levantamento das dimensões dos corpos de prova .....	68
Figura 3.7 - Sequência do procedimento para os ensaios de resistência mecânica .	69
Figura 3.8 - Sequência do procedimento para determinar a absorção de água .....	70
Figura 3.9 - Sequência do procedimento para obter o pH dos materiais .....	72
Figura 3.10 - (a) MEV – (b) desenho esquemático com seus principais componentes .....	73
Figura 3.11 - Amostras de fosfogesso e gesso mineral na câmara de vácuo do MEV .....	75
Figura 3.12 - EDAX conectado ao MEV .....	76
Figura 4.1 – Resistência mecânica à flexão e à compressão .....	82
Figura 4.2 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 157°C/120min .	84
Figura 4.3 – DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 159°C/120min	84
Figura 4.4 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 161°C/120min .	85
Figura 4.5 - DV dos corpos de prova produzidos em gesso mineral .....	86
Figura 4.6 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 157°C/120min .....	88

Figura 4.7 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 159°C/120min.....	88
Figura 4.8 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 161°C/120min.....	89
Figura 4.9 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do gesso mineral .....	89
Figura 4.10 - Amostras de fosfogesso hemidratado e gesso mineral submetidas à MEV .....	90
Figura 4.11 - Amostras de fosfogesso hemidratado e gesso mineral no interior do MEV .....	91
Figura 4.12 - MEV de fosfogesso hemidratado e gesso mineral (ampliado 50.000x)	91
Figura 4.13 - EDX do corpo de prova confeccionado em fosfogesso hemidratado...	93
Figura 4.14 - EDX do corpo de prova confeccionado em gesso mineral.....	94

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1.1 - Reservas de rochas fosfáticas em operação no Brasil.....	24
Tabela 2.1 – Pesquisadores que já avaliaram ambientalmente o fosfogesso .....	29
Tabela 2.2 – Normas brasileiras para a classificação de resíduos.....	37
Tabela 2.3 – Componentes obtidos na solubilização em duplicata .....	37
Tabela 2.4 - Classificação de toxicidade por lixiviação (subst. inorgânicas) .....	38
Tabela 2.5 - Classificação de toxicidade por solubilização (subst. inorgânicas) .....	38
Tabela 2.6 - Concentração de radionuclídeos naturais do fosfogesso de três procedências do Brasil.....	41
Tabela 2.7 - Análise da composição química do fosfogesso.....	43
Tabela 2.8 - Caracterização química do fosfogesso .....	43
Tabela 2.9 – Resistência à compressão axial das composições.....	58
Tabela 4.1 – granulometria do gesso mineral .....	77
Tabela 4.2 – granulometria do fosfogesso hemidratado.....	78
Tabela 4.3 - módulo de finura do gesso mineral .....	78
Tabela 4.4 - módulo de finura do fosfogesso .....	78
Tabela 4.5 – massa unitária do gesso mineral .....	79
Tabela 4.6 – massa unitária do fosfogesso hemidratado .....	79
Tabela 4.7 – pH das amostras analisadas .....	80
Tabela 4.8 – Análise preliminar de resistência mecânica à tração na flexão e à compressão.....	81
Tabela 4.9 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 157°C/120min	83
Tabela 4.10 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 159°C/120min .....	83
Tabela 4.11 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 161°C/120min .....	83

Tabela 4.12 - DV dos corpos de prova produzidos em gesso mineral .....	85
Tabela 4.13 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 157°C/120min.....	87
Tabela 4.14 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 159°C/120min.....	87
Tabela 4.15 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 161°C/120min.....	87
Tabela 4.16 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do gesso mineral .....	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Alumina
ANDA	-	Associação Nacional para Difusão de Adubos
Ca <sup>2+</sup>	-	Cálcio
CaCO <sub>3</sub>	-	Carbonato de cálcio
CaSO <sub>4</sub> .½H <sub>2</sub> O-	-	Sulfato de Cálcio hemidratado
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O-	-	Sulfato de Cálcio di-hidratado
CNEN	-	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CO <sub>2</sub>	-	Anidrido carbônico
CP	-	Corpo de prova
DV	-	Densidade a verde
EDAX	-	Energy Dispersive X-ray Analysis
EDS	-	Energy Dispersive Spectrometry
EDX	-	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
EUA	-	Estados Unidos da América
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	Óxido de ferro
ICRP	-	International Commission on Radiological Protection
IPEN	-	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IFDC	-	International Fertilizer Development Center

LCE	-	Laboratório de Caracterização Estrutural (DEMa/UFSCar)
LIEC	-	Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (DQ/UFSCar)
LMC	-	Laboratório de Materiais e Componentes (DECiv/UFSCar)
LSE	-	Laboratório de Sistemas Estruturais (DECiv/UFSCar)
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
MF	-	Módulo de finura
MU	-	Massa unitária
NbO	-	Monóxido de nióbio
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
ONU	-	Organização das Nações Unidas
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	Pentóxido de fósforo (Anidrido do ácido fosfórico)
pH	-	Potencial de hidrogênio
SEM	-	Scanning Electron Microscopy
SiO <sub>2</sub>	-	Dióxido de silício
SO <sub>3</sub>	-	Anidrido sulfúrico
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	Sulfato
SrO	-	Óxido de estrôncio
UNFPA	-	United Nations Population Fund
UNSCEAR	-	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
US EPA	-	United States Environmental Protection Agency



$Y_2O_3$  - Óxido de ítrio (III)

LISTA DE UNIDADES DE MEDIDAS

---

Bq	Becquerel
Bq.kg <sup>-1</sup>	Becquerel por kg
MPa	Mega Pascal
mSv.a <sup>-1</sup>	miliSievert por ano
M t	Milhões de toneladas
Sv	Sievert

SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1 Justificativa</b> .....	<b>24</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>27</b>
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b> .....	<b>28</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1 Fosfogesso</b> .....	<b>29</b>
2.1.1 Rochas fosfáticas.....	30
2.1.2 Produção de ácido fosfórico.....	33
2.1.3 Estrutura molecular .....	35
2.1.4 Classificação como resíduo .....	36
2.1.5 Radioatividade .....	39
2.1.6 Composição química do fosfogesso .....	42
2.1.7 Composição mineralógica do fosfogesso.....	44
2.1.8 Aplicações atuais .....	44
2.1.9 Disposição e descarte.....	45
<b>2.2 Gesso mineral</b> .....	<b>50</b>
2.2.1 Gesso beta.....	54
2.2.2 Gesso alfa.....	55
<b>2.3 Temperatura e tempo de calcinação</b> .....	<b>55</b>
<b>2.4 Aplicações do fosfogesso na construção civil</b> .....	<b>56</b>
<b>2.5 Aplicações do fosfogesso em aterros sanitários</b> .....	<b>59</b>
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>61</b>
<b>3.1 Materiais</b> .....	<b>62</b>

3.1.1	Fosfogesso .....	62
3.1.2	Gesso mineral.....	62
3.1.3	Água .....	62
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>63</b>
3.2.1	Coleta do fosfogesso .....	63
3.2.2	Desidratação do fosfogesso.....	63
3.2.1	Desaglomeração do fosfogesso.....	64
3.2.2	Determinação das propriedades físicas do pó de fosfogesso.....	65
3.2.3	Análise granulométrica dos materiais .....	66
3.2.4	Moldagem dos corpos de prova.....	66
3.2.5	Densidade a verde.....	68
3.2.6	Ensaio de resistência mecânica.....	69
3.2.7	Ensaio de absorção de água.....	70
3.2.8	Análise de pH dos materiais utilizados .....	71
3.2.9	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	72
3.2.10	Microanálise de raios-X.....	74
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>Determinação das propriedades físicas do pó de fosfogesso.....</b>	<b>77</b>
4.1.1	Módulo de finura .....	78
4.1.2	Massa unitária.....	79
<b>4.2</b>	<b>Determinação do pH das amostras de fosfogesso .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3</b>	<b>Determinação do intervalo com melhor combinação entre Temperatura e Tempo de calcinação para o fosfogesso.....</b>	<b>81</b>
<b>4.4</b>	<b>Determinação da densidade a verde .....</b>	<b>82</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise da resistência mecânica para os corpos de prova produzidos em fosfogesso desidratado em 120 minutos .....</b>	<b>86</b>

4.6	Microscopia eletrônica das amostras .....	90
4.7	Análise por energia dispersiva de raios X (EDX) .....	92
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	96
5.1	Conclusões.....	96
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	96
	REFERÊNCIAS.....	98

# 1. INTRODUÇÃO

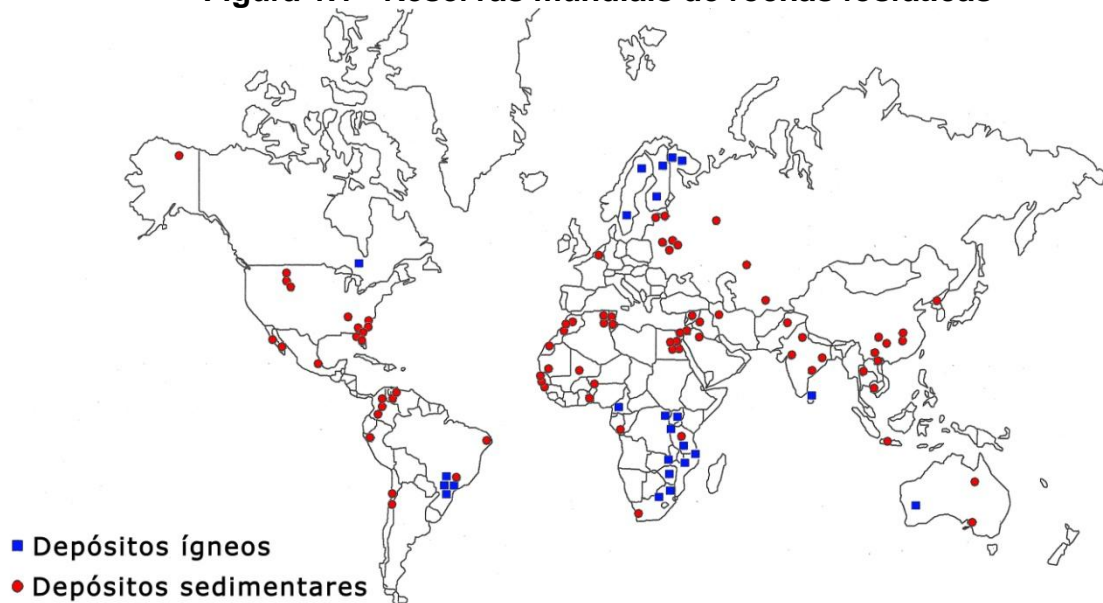
O Fósforo (P), um dos principais macronutrientes utilizados na agricultura, é encontrado nos fertilizantes fosfatados, onde o ácido fosfórico é a principal matéria-prima para a composição destes fertilizantes. Entretanto, para cada tonelada de ácido fosfórico produzida, o processo industrial utilizado gera de 4 a 6 toneladas de fosfogesso (BECKER, 1989) e (BARTI e ALBUQUERQUE,1992), hoje um grande passivo ambiental.

Anualmente são geradas mais de 150 milhões de toneladas de fosfogesso relativos à produção mundial de ácido fosfórico, sendo aproximadamente 12 milhões de toneladas geradas no Brasil (MAZZILLI et al., 2000). Estima-se que no Brasil haja mais de 160 milhões de toneladas de fosfogesso dispostas em aterros a céu aberto, não ocorrendo uma destinação adequada e compatível ao volume gerado.

As rochas fosfáticas predominantes no Brasil são de origem magmática (ígnea), e o fosfogesso gerado não apresenta risco de contaminação por radioatividade para os construtores e seus usuários (CANUT, 2006 e COSTA, 2011). O fosfogesso quando gerado a partir de rochas fosfáticas de origem sedimentar contém radionuclídeos e teores de metais pesados acima do limite permitido para uso humano. Na Figura 1.1 estão mapeadas as localizações das reservas mundiais de rochas fosfáticas segundo sua origem.

Segundo VAN KAUWENBERGH (2010), 77% das reservas mundiais de rochas fosfáticas são de origem sedimentar.

**Figura 1.1 - Reservas mundiais de rochas fosfáticas**



(Fonte: Adaptado de VAN KAUWENBERGH, 2010).

Conforme o exposto, ocorre a predominância dos depósitos sedimentares de rochas fosfáticas em relação aos depósitos magmáticos, e o Brasil encontra-se entre os poucos países que possuem reservas de rochas fosfáticas de origem magmática.

Na Figura 1.2 estão localizadas as reservas de rochas fosfáticas em operação no Brasil, descritas na Tabela 1.1.

**Figura 1.2 - Reservas de rochas fosfáticas em operação no Brasil**



(Fonte: Adaptado de Vale Fertilizantes, 2010)

**Tabela 1.1 - Reservas de rochas fosfáticas em operação no Brasil**

<b>Cidade - Estado</b>	<b>Mineradora</b>
<b>Angico dos Dias - BA</b>	Galvani
<b>Irecê - BA</b>	Galvani
<b>Lagamar - MG</b>	Galvani
<b>Catalão - GO</b>	Copebrás
<b>Catalão - GO</b>	Vale Fertilizantes
<b>Patos de Minas - MG</b>	Vale Fertilizantes
<b>Araxá - MG</b>	Vale Fertilizantes
<b>Tapira - MG</b>	Vale Fertilizantes
<b>Juquiá - SP</b>	Socal
<b>Cajati - SP</b>	Vale Fertilizantes

(Fonte: Adaptado de Vale Fertilizantes, 2010)

No Brasil os procedimentos utilizados para o descarte do fosfogesso têm sido a disposição em pilhas em áreas próximas às empresas geradoras (FREITAS, 1992<sup>1</sup> *apud* CANUT, 2006).

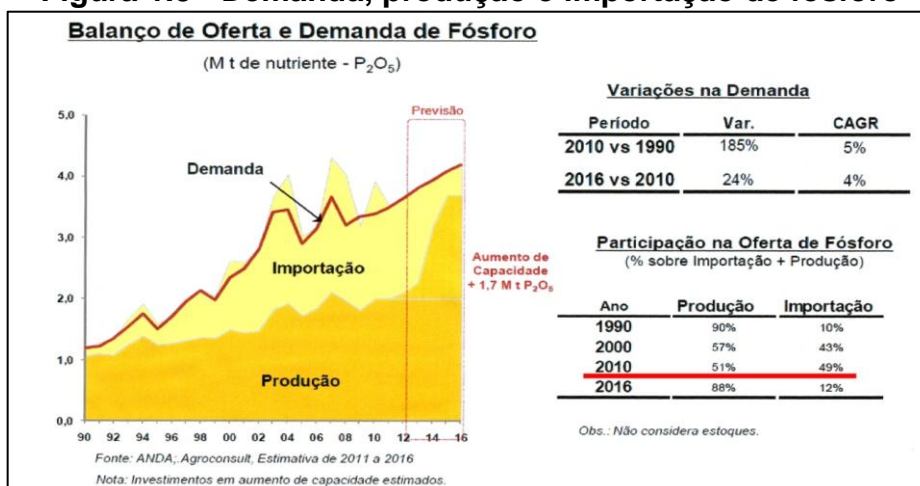
## 1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), o Brasil não é autossuficiente na produção de fertilizantes fosfatados, e consome aproximadamente 4 milhões de toneladas anuais, produzindo 55% desse valor, e importando o restante (Figuras 1.3 e 1.4).

<sup>1</sup> FREITAS, J. B. de. A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA



**Figura 1.3 - Demanda, produção e importação de fósforo**

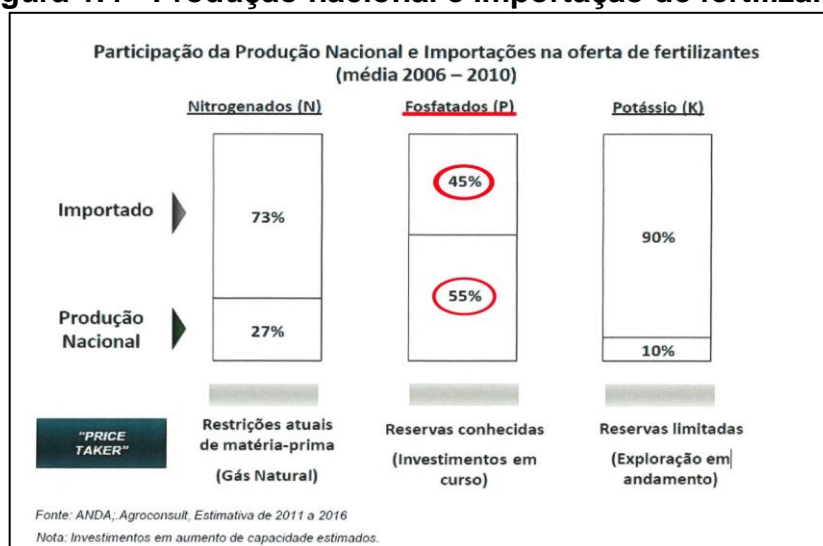


(Fonte: <<http://www.anda.org.br/multimidia/investimentos.pdf>>. Acesso em: 11/12/2012)

Analisando a Figura 1.3, nota-se que a previsão de demanda brasileira de nutrientes fosfatados para o ano 2016 é de aproximadamente 4 milhões de toneladas, sendo que aproximadamente 3,5 milhões de toneladas, 88%, serão produzidas no Brasil, acarretando a geração de aproximadamente 17 milhões de toneladas de fosfogesso.

Na Figura 1.4 estão representados os percentuais de produção e importação de fertilizantes fosfatados pelo Brasil no período de 2006 a 2010.

**Figura 1.4 - Produção nacional e importação de fertilizantes**



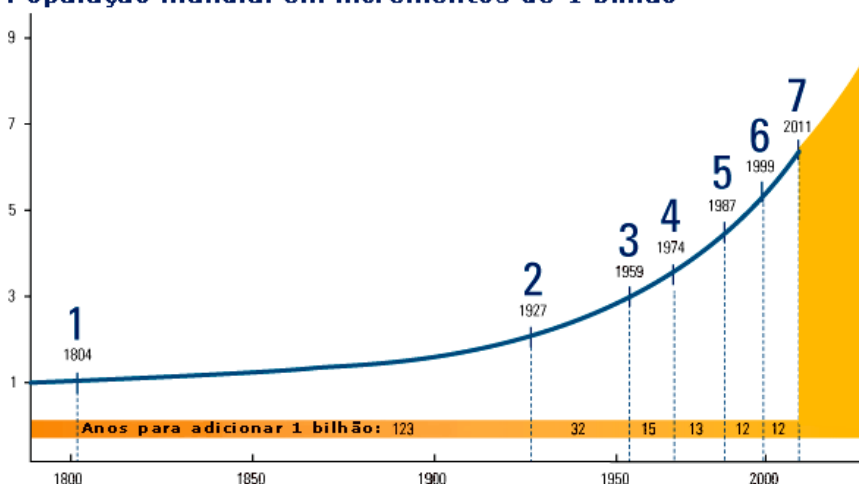
(Fonte: <<http://www.anda.org.br/multimidia/investimentos.pdf>>. Acesso em: 11/12/2012)

A busca pela autossuficiência em fertilizantes à base de fósforo tem motivado grandes investimentos no setor, o que deve refletir no aumento da produção de ácido fosfórico e, conseqüentemente, dobrar a geração de fosfogesso.

Segundo o relatório publicado em 2011 pelo Fundo de População das Nações Unidas (UNFPA), a população mundial ultrapassou 7 bilhões de habitantes, e em 2050 será de aproximadamente 9,3 bilhões, devendo ultrapassar 15 bilhões em 2100. Para evitar uma grande instabilidade social e política, será necessário um aumento significativo na produção de alimentos e, conseqüentemente, também de fertilizantes fosfatados, o que deve levar a uma geração cada vez maior de fosfogesso.

Na Figura 1.5 está representada a velocidade do crescimento da população mundial em função do tempo. Foram necessários 123 anos para a população mundial passar de 1 bilhão para 2 bilhões de habitantes, mas a curva de crescimento tem se alterado, de modo que atualmente para a população mundial aumentar na mesma proporção, são necessários apenas 12 anos.

**Figura 1.5 - Curva de Crescimento Populacional Mundial**  
População mundial em incrementos de 1 bilhão



(Fonte: Adaptado de United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2011)

Neste cenário, a necessidade de fertilizantes fosfatados para a produção de alimentos acompanhará a curva apresentada na Figura 1.5, e, conseqüentemente, a de geração de fosfogesso também. Portanto, encontrar uma aplicação para esse passivo ambiental é muito importante para a sociedade.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal dessa pesquisa foi determinar uma relação entre a temperatura e o tempo de calcinação do fosfogesso para estudar a possibilidade de adequar a sua utilização na construção civil. Em especial, foram estudados os parâmetros físicos e mecânicos adequados para que o fosfogesso possa ser utilizado na construção civil.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar uma relação ideal entre a temperatura e o tempo de calcinação do fosfogesso, procedimento que irá desidratá-lo, convertendo sua forma original di-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), com duas moléculas de água, para a forma hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ), com meia molécula de água, conforme expresso na equação (1);



- Determinar a quantidade de água necessária, estequiometricamente, para a reidratação da amostra de fosfogesso durante a preparação dos corpos de prova, com o auxílio da Equação (2);



- Determinar os valores de resistência mecânica, tanto à tração na flexão quanto à compressão em corpos de prova produzidos em fosfogesso;
- Determinar os índices de absorção de água em corpos de prova produzidos em fosfogesso.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de Mestrado está estruturada em 5 capítulos.

No capítulo 1, **Introdução**, são apresentadas as justificativas e necessidade da pesquisa, os objetivos e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2, **Revisão Bibliográfica**, aborda uma revisão bibliográfica sobre o resíduo industrial fosfogesso, apresentando os tipos de rochas fosfáticas, o processo de produção do ácido fosfórico e a consequente geração do fosfogesso, sua classificação como resíduo, sua radioatividade, as aplicações atuais e a disposição final e descarte.

No capítulo 3, **Materiais e Métodos**, são apresentados os materiais e métodos utilizados para a avaliação da possibilidade de utilização do fosfogesso na construção civil, com avaliação de suas propriedades mecânicas e físicas.

No capítulo 4, **Resultados e Discussões**, são apresentados os resultados da pesquisa em conformidades com os experimentos realizados, compreendendo a análise da composição química, composição mineralógica, granulometria (módulo de finura e massa unitária), pH, resistência mecânica, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálise de energia dispersiva de raios-X (EDX) e discussões sobre os ensaios realizados.

E, finalmente, no capítulo 5, **Considerações Finais**, são apresentadas as conclusões dos experimentos realizados e discutidos no capítulo anterior, com vista aos objetivos considerados no capítulo 1, bem como sugestões para estudos adicionais necessários para o preenchimento de possíveis lacunas desta pesquisa.

Na sequência foram apresentadas as referências bibliográficas citadas na pesquisa.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre o resíduo industrial fosfogesso, apresentando os tipos de rochas fosfáticas, o processo de produção do ácido fosfórico e a consequente geração do fosfogesso, sua classificação como resíduo, sua radioatividade, as aplicações atuais e a disposição final e descarte.

### 2.1 FOSFOGESSO

Na Tabela 2.1 encontram-se alguns pesquisadores que já avaliaram ambientalmente o fosfogesso como possível matéria prima a ser utilizada na construção civil.

**Tabela 2.1 – Pesquisadores que já avaliaram ambientalmente o fosfogesso**

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Trabalho</b>
MAZZILLI, B.& SAUEIA, C. H. R.	1997	Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material de construção
SAUEIA, C. H. R.	1998	Caracterização radioquímica do fosfogesso e implicações radiológicas de sua utilização como material de construção
MAZZILLI et al.	2000	Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum
MAZZILLI et al.	2000	Implicações radiológicas do uso do fosfogesso como material de construção no Brasil
ÂNGULO et al.	2001	Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil
CANUT, M. M. C	2006	Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção
VILLAVERDE, F. L.	2008	Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso
JACOMINO et al.	2008	Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries
JACOMINO et al.	2009	Radionuclides and heavy metal contents in phosphogypsum samples in comparison to cerrado soils

**Tabela 2.1 - Continuação**

COSTA, L. J. P.	2011	Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências
MELO, R. A. A. & SILVA, D. G.	2013	Estudo da viabilidade do uso do fosfogesso como matéria-prima na produção de materiais cerâmicos

(Fonte: Autor, 2014)

O fosfogesso é composto basicamente por sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), contendo também fluoretos, fosfatos, matéria orgânica e minerais como Alumínio e Ferro, que o diferencia do gesso mineral (RABELO et al., 2001). Segundo NUERNBERG et al. (2005), o fosfogesso recebe tal denominação por conter também em sua composição resíduo de fósforo, (0,7% a 0,9%), sendo também referenciado na literatura como gesso agrícola, gesso químico ou gesso sintético.

O fosfogesso é o mais importante dos resíduos de sulfato de cálcio em função da grande quantidade gerada mundialmente.

### 2.1.1 ROCHAS FOSFÁTICAS

As rochas fosfáticas utilizadas para a produção de ácido fosfórico podem ser de origem sedimentar ou magmática.

As rochas de origem sedimentar são denominadas Fosforita, e são rochas que se formaram em função do acúmulo e consolidação de materiais decompostos de rochas ou de resíduos pré-existentes, gerando fosfatos reativos (PAVINATO e ZAVASCHI, 2013).

As rochas de origem magmáticas são denominadas Apatitas, e são rochas que se formaram pela solidificação do magma de erupções vulcânicas, com cristais muito duros (PAVINATO e ZAVASCHI, 2013).

Cerca de 85% da produção mundial de fósforo é obtida de rochas sedimentares e o restante, 15%, de rochas magmáticas. No Brasil mais de 95% provém de rochas magmáticas, pela vocação geológica (VALE Fertilizantes, 2010).

Segundo LAPIDO-LOUREIRO e MELAMED (2006), as rochas fosfáticas utilizadas na produção de ácido fosfórico no Brasil, e que recebem a denominação de Apatita, referem-se ao grupo de minerais: fluorapatita, clorapatita e hidroxilapatita, sendo a variedade mais comum a fluorapatita, cuja célula unitária é composta por  $\text{Ca}_{10}\text{P}_6\text{O}_{24}\text{F}_2$ .

A principal aplicação da apatita é na fabricação de ácido fosfórico para fertilizantes que, tanto em escala mundial quanto nacional, consome cerca de 90% da sua produção, restando apenas 10% para outras aplicações (LAPIDO-LOUREIRO e MELAMED, 2006).

No Brasil, 95% das reservas fosfáticas são provenientes de depósitos magmáticos e as mais importantes estão localizadas nas regiões, também denominadas complexos, de Ouvidor (GO), Tapira (MG) e Cajati (SP) (VALE Fertilizantes, 2010), cujas vistas e dimensões da mineração estão nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3.

**Figura 2.1 - Mineração de rochas fosfáticas em Ouvidor (GO)**



(Fonte: <<http://zip.net/bgnlQN>>. Acesso em: 15/10/2012)



**Figura 2.2 - Mineração de rochas fosfáticas em Tapira (MG)**



(Fonte: <<http://zip.net/bhnlZL>>. Acesso em: 17/09/2012)

**Figura 2.3 - Mineração de Rochas Fosfáticas em Cajati (SP)**



(Fonte: <<http://zip.net/bxnmyL>>. Acesso em: 15/10/2012)

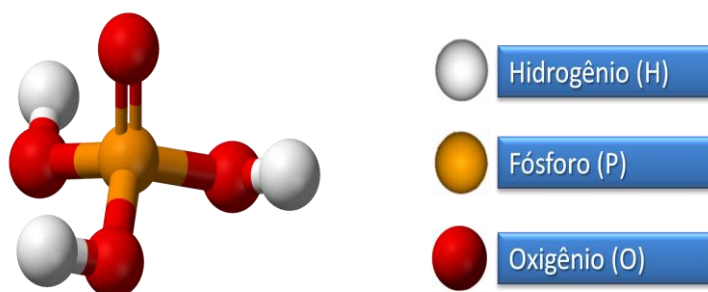
No Brasil, em 2007, as principais reservas fosfáticas estavam distribuídas nos Estados de Minas Gerais (67%), Goiás (14%) e São Paulo (6%), correspondendo a 87% do total, e os 13% restante estão distribuídos nos Estados de Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba (MENDO, 2009).



### 2.1.2 PRODUÇÃO DE ÁCIDO FOSFÓRICO

O Ácido fosfórico, mais precisamente conhecido como ácido ortofosfórico, é um composto químico cuja fórmula molecular é  $H_3PO_4$  e a estrutura molecular espacial pode ser observada na Figura 2.4. É o mais importante dos ácidos derivados do fósforo e classificado como um ácido fraco. É a principal matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes fosfatados de alta concentração.

**Figura 2.4 - Esquema da estrutura molecular espacial do ácido fosfórico**



(Fonte: Adaptado de <<http://zip.net/blnlgB>>. Acesso em: 01/06/2013)

A produção de ácido fosfórico pode ser realizada por duas vias: “Via Úmida ou Sulfúrica”, na qual é gerado o subproduto fosfogesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), e “Via Seca ou Térmica”, que apresenta como subproduto um silicato de Cálcio ( $CaSiO_3$ ) (LAPIDO-LOUREIRO et al., 2008).

No processo por via úmida o ácido fosfórico é obtido com algumas impurezas originalmente contidas na rocha, e é aplicado principalmente na produção de fertilizantes.

No processo por via seca o ácido fosfórico produzido é mais puro e mais apropriado para ser utilizado na indústria alimentícia e farmacêutica. Entretanto, os custos inerentes de produção por meio desta rota são comparativamente maiores, razão pela produção mundial em larga escala do ácido fosfórico ser por via úmida e não por via térmica (HANNACHI et al., 2007).

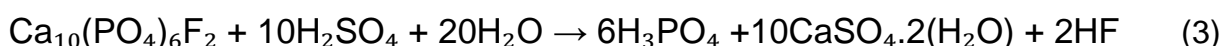
O fosfogesso só é gerado pela rota sulfúrica com uso de concentrados de apatita, predominantemente fluorapatita (FERNANDES et al., 2010).

Dos fertilizantes fosfatados produzidos mundialmente, 90% são obtidos por via úmida, 2% por via térmica e 6% são aplicados no solo sob a forma natural (LAPIDO-LOUREIRO e MELAMED, 2006).

Segundo CARDOSO (2013), além da produção de fertilizantes, destacam-se também as seguintes aplicações para o ácido fosfórico:

- **Indústria alimentícia:** acidulante para refrigerantes (principalmente os de cola), doces, molhos para saladas, geleias, fermentos biológicos, refinação do açúcar, estabilizante de óleos vegetais, usinas de chocolate;
- **Indústria farmacêutica:** na obtenção de insulinas, produção de antibióticos, fortificantes, entre outros;
- **Indústria química:** na fabricação de fosfato bicálcico para a produção de ração animal, produção de carvão, formulação de detergentes, decapante, antiferrugem;
- No tratamento biológico de efluentes;
- No polimento químico ou eletroquímico de peças de alumínio.

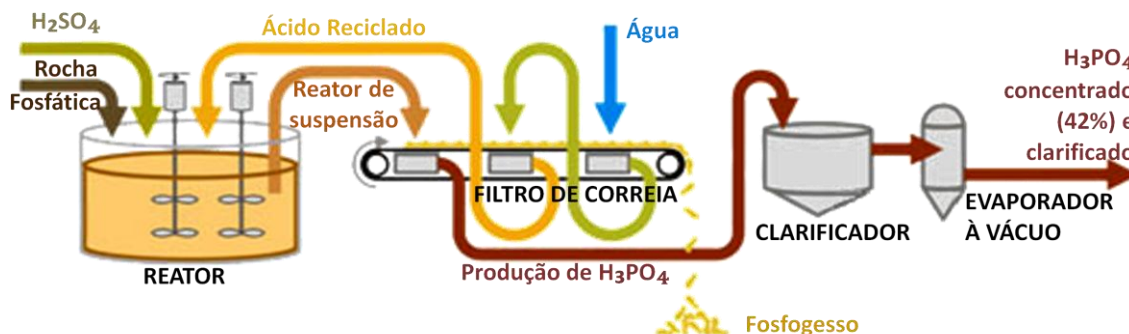
A Equação (3) resume o processo mais utilizado para a produção do ácido fosfórico, no qual é gerado o fosfogesso.



Na Equação (3), a reação indica que além do ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) e do fosfogesso di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), também é obtido o ácido fluorídrico (HF).

A rota de produção do ácido fosfórico usada pelas empresas brasileiras é por via úmida, representada pela Figura 2.5, onde a rocha fosfática é atacada pelo ácido sulfúrico concentrado a uma temperatura de aproximadamente 70°C (SILVA, 2001).

**Figura 2.5 - Fluxograma da produção de ácido fosfórico por via úmida**



(Fonte: Adaptado de <<http://zip.net/bpj53v>>. Acesso em: 18/05/2013)

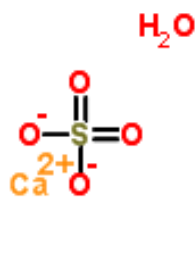
Na produção do ácido fosfórico por via úmida a rocha fosfática previamente britada, é misturada com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e com ácido reciclado em um reator com agitação, para homogeneização e aumento da velocidade da reação. A suspensão resultante é transferida para um filtro horizontal de correia, onde o ácido fosfórico é filtrado e separado do fosfogesso. Em seguida o ácido fosfórico passa por um clarificador e por um evaporador a vácuo para estabelecer a concentração necessária para a produção dos fertilizantes fosfatados.

A rota de produção de ácido fosfórico por via úmida, ou rota sulfúrica, é a mais utilizada mundialmente em função do baixo custo do ácido sulfúrico e também pelo alto custo com energia na rota térmica. No Brasil a rota úmida é a única utilizada pelas empresas produtoras de ácido fosfórico.

### 2.1.3 ESTRUTURA MOLECULAR

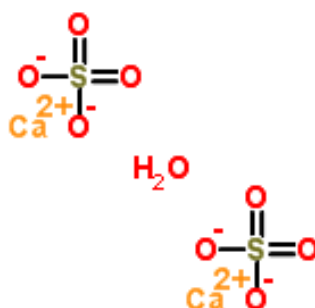
O sulfato de cálcio na forma di-hidrato possui duas moléculas de água para cada molécula de sulfato de cálcio (Figura 2.6), e após sua calcinação para a forma hemidrato, uma molécula de água é compartilhada por duas moléculas de sulfato de cálcio (Figura 2.7).

**Figura 2.6 - Esquema da estrutura molecular do sulfato de cálcio di-hidrato**



(Fonte: Adaptado de <<http://zip.net/bfnlxG>>. Acesso em: 20/05/2013)

**Figura 2.7 - Esquema da estrutura molecular do sulfato de cálcio hemidrato**



(Fonte: Adaptado de <<http://zip.net/bynm1>>. Acesso em: 20/05/2013)

A estrutura molecular do fosfogesso é idêntica à do gesso mineral, tanto na forma di-hidrato como na forma hemidrato.

#### **2.1.4 CLASSIFICAÇÃO COMO RESÍDUO**

Todo resíduo sólido deve ser classificado quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, seguindo as recomendações normativas brasileiras para o seu controle e gerenciamento.

A classificação dos resíduos é muito importante para a análise de um possível aproveitamento deste como matéria-prima e dos cuidados que se deve ter quanto aos procedimentos de armazenagem, manipulação, transporte e disposição final.

Na Tabela 2.2 encontram-se as normas brasileiras para a devida classificação de resíduos.

**Tabela 2.2 – Normas brasileiras para a classificação de resíduos**

<b>Norma Brasileira Registrada (NBR)</b>	<b>Título</b>
<b>NBR 10004</b>	Resíduos Sólidos - Classificação
<b>NBR 10005</b>	Lixiviação de Resíduos - Procedimento
<b>NBR 10006</b>	Solubilização de Resíduos - Procedimento
<b>NBR 10007</b>	Amostragem de Resíduos - Procedimento

(Fonte: Adaptado de ABNT, 2004)

Segundo PAVANIN et al. (2005), o fosfogesso é de origem conhecida e, de acordo com os Anexos da NBR 10004/2004, não se enquadra dentro dos resíduos perigosos de fontes não específicas (Anexo A) e nem nos resíduos perigosos de fontes específicas (Anexo B), bem como também não possui substâncias que conferem periculosidade aos resíduos (Anexo C). Também as substâncias agudamente tóxicas ou tóxicas (Anexos D e E respectivamente) não são encontradas. O pH do resíduo foi de 3,39 e o índice de acidez 5,69%, e o extrato lixiviado, cuja a análise focou-se no fluoreto, encontrou-se concentração do mesmo igual a 1,27mg/L, muito abaixo de 150mg/L (limite máximo permitido no Anexo F).

Pela solubilização (em duplicata), PAVANIN et al. (2005), obteve os resultados apresentados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Componentes obtidos na solubilização em duplicata**

<b>Componente</b>	<b>Valor observado (mg/L)</b>	<b>Valor limite (mg/L)</b>
<b>fluoreto</b>	1,86	1,50
<b>manganês</b>	1,50	0,10
<b>cobre</b>	0,04	2,00
<b>alumínio</b>	2,50	0,20
<b>sódio</b>	1,24	200,00
<b>ferro</b>	1,67	0,30
<b>zinco</b>	0,18	5,00
<b>sulfato( expresso em SO<sub>4</sub>-2)</b>	103,00	250,00

(Fonte: Adaptado de PAVANIN et al., 2005)

No extrato solubilizado a presença das substâncias flúor, manganês, alumínio, ferro e sulfato em concentrações superiores às do anexo G. Contudo, pela normatização contida na NBR 10004, PAVANIN et al. (2005), concluem que o fosfogesso analisado, por não possuir características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, deve ser enquadrado como Classe II - não inerte.

Segundo OLIVEIRA (2008), que realizou testes no sentido de avaliar se o resíduo em estudo seria classificado como perigoso ou não. Concluiu, conforme dados apresentados nas Tabelas 2.4 e 2.5, que o fosfogesso foi classificado como Classe II A - Não Perigoso, Não Inerte, Não Corrosivo e Não Reativo pelo fato dos limites para o teste de toxicidade por solubilização terem sido ultrapassados apenas para os parâmetros Arsênio, Fluoretos, Alumínio, Ferro, Manganês e Sulfatos, ressaltando que a Norma ABNT NBR 10004:2004 não inclui a realização de análises para a determinação da concentração de radionuclídeos.

**Tabela 2.4 - Classificação de toxicidade por lixiviação (subst. inorgânicas)**

<b>Parâmetros</b>	<b>Limite Máximo Permitido (mg/L)</b>	<b>Concentração no Resíduo Lixiviado (mg/L)</b>
Arsênio	1,0	0,001
Bário	70,0	< 0,005
Cádmio	0,5	< 0,001
Chumbo	1,0	< 0,01
Cromo Total	5,0	0,02
Fluoretos	150,0	17,0
Mercúrio	0,1	< 0,0002
Prata	5,0	< 0,02
Selênio	1,0	< 0,01

(Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2008)

**Tabela 2.5 - Classificação de toxicidade por solubilização (subst. inorgânicas)**

<b>Parâmetros</b>	<b>Limite Máximo Permitido (mg/L)</b>	<b>Concentração no Resíduo Solubilizado (mg/L)</b>
<b>Arsênio (mg/L)</b>	<b>0,01</b>	<b>0,05</b>
Bário (mg /L)	0,7	< 0,005
Cádmio (mg /L)	0,005	< 0,001
Chumbo (mg /L)	0,01	< 0,04
Cianeto (mg /L)	0,07	< 0,01

**Tabela 2.5 - Continuação**

Cromo Total (mg /L)	<b>0,05</b>	<b>0,04</b>
Fenóis Totais (mg /L)	0,01	< 0,001
<b>Fluoretos (mg /L)</b>	<b>1,5</b>	<b>52,0</b>
Mercúrio (mg /L)	0,0001	< 0,0002
Nitrato (mg /L)	10,0	< 0,05
Prata (mg /L)	0,05	0,01
Selênio (mg /L)	0,01	< 0,01
<b>Alumínio (mg /L)</b>	<b>0,2</b>	<b>3,91</b>
Cloreto (mg /L)	250,0	3,9
Cobre (mg /L)	2,0	0,33
<b>Ferro (mg /L)</b>	<b>0,3</b>	<b>2,43</b>
<b>Manganês (mg /L)</b>	<b>0,1</b>	<b>2,66</b>
Sódio (mg /L)	200,0	48,7
Surfactantes (mg /L)	0,5	0,33
<b>Sulfato (mg /L)</b>	<b>250,0</b>	<b>1.535,0</b>
Zinco (mg /L)	5,0	0,44

(Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2008)

JACOMINO et al. (2009) também classificou o fosfogesso como Classe IIA - Não Perigoso, Não Inerte, Não Corrosivo e Não Reativo.

### 2.1.5 RADIOATIVIDADE

Quanto à radioatividade medida no fosfogesso gerado no Brasil, segundo CANUT (2006), ele encontra-se dentro do nível prescrito pelas agências de radioproteção (CNEN, CDTN, entre outras). Portanto não apresenta riscos de contaminação por radioatividade para os usuários e seus manipuladores, tornando viável o seu reaproveitamento como matéria-prima para confecção de novos materiais para a construção de edificações.

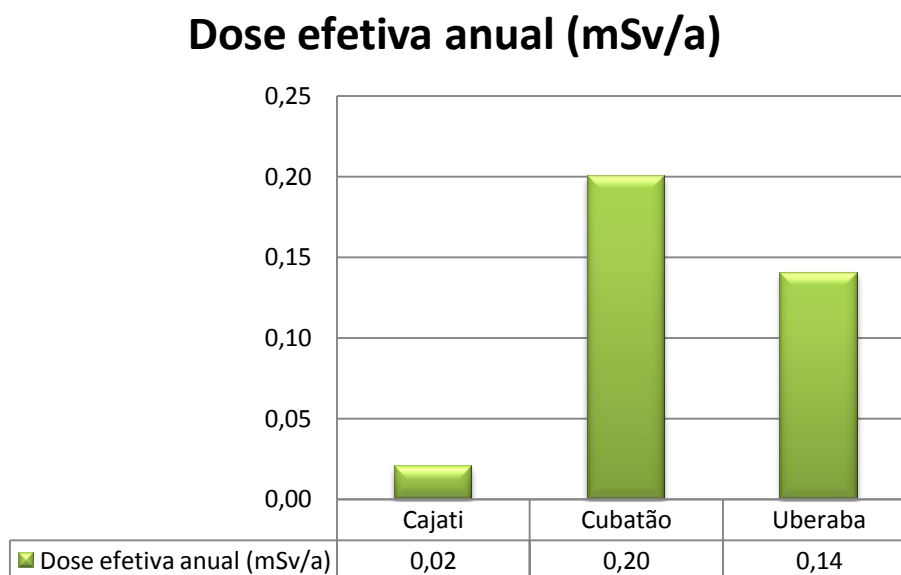
Quanto à exalação de radônio,  $^{222}\text{Rn}$ , segundo COSTA (2011), para o fosfogesso das procedências analisadas de Cajati e Cubatão, ambas do Estado de São Paulo, e Uberaba do Estado de Minas Gerais, as doses efetivas anuais para um indivíduo ficaram abaixo de  $1 \text{ mSv.a}^{-1}$ , limite estabelecido pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica.

A dose efetiva é a soma das doses equivalentes que leva em conta o efeito biológico causado pela radiação absorvida em tecidos vivos. A unidade de medida da dose equivalente é o Sievert (Sv) ou seu sub-múltiplo o milisievert (mSv).

A radioatividade medida no fosfogesso é da mesma magnitude das observadas nos fertilizantes, fato este que torna viável o seu reaproveitamento como insumo aplicável à construção civil (MAZZILLI, 2005<sup>2</sup> *apud* CANUT, 2006).

VILLAVERDE (2008) analisou a dose efetiva anual do fosfogesso de três procedências do Brasil: Cajati (SP), Cubatão (SP) e Uberaba (MG), os valores obtidos por ele são relatados no gráfico da Figura 2.8.

**Figura 2.8 - Dose efetiva anual em fosfogesso de três procedências do Brasil**



(Fonte: Adaptado de VILLAVERDE, 2008)

Segundo VILLAVERDE (2008):

- A Comissão Europeia (EC, 1999) recomenda que a dose efetiva anual recebida por um indivíduo em uma residência deve ser inferior a 0,3 mSv;

<sup>2</sup> MAZZILLI, P. B. Desafios tecnológicos para o reaproveitamento do fosfogesso: A radioatividade do fosfogesso. Instituto de pesquisas energéticas e Nucleares. Laboratório de radiometria ambiental. São Paulo. 2005.



- O Comitê Científico da ONU sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR, 2000) sugere que a dose anual por exposição gama externa não deve ultrapassar 0,48 mSv;
- A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 1990) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2005) estabeleceram o limite de 1 mSv para a dose efetiva anual para um indivíduo.

VILLAVERDE (2008) analisou a concentração de radionuclídeos naturais do fosfógeno de três procedências do Brasil: Cajati (SP), Cubatão (SP) e Uberaba (MG). Os valores obtidos por ele estão na Tabela 2.6 e ilustrados no gráfico da Figura 2.9.

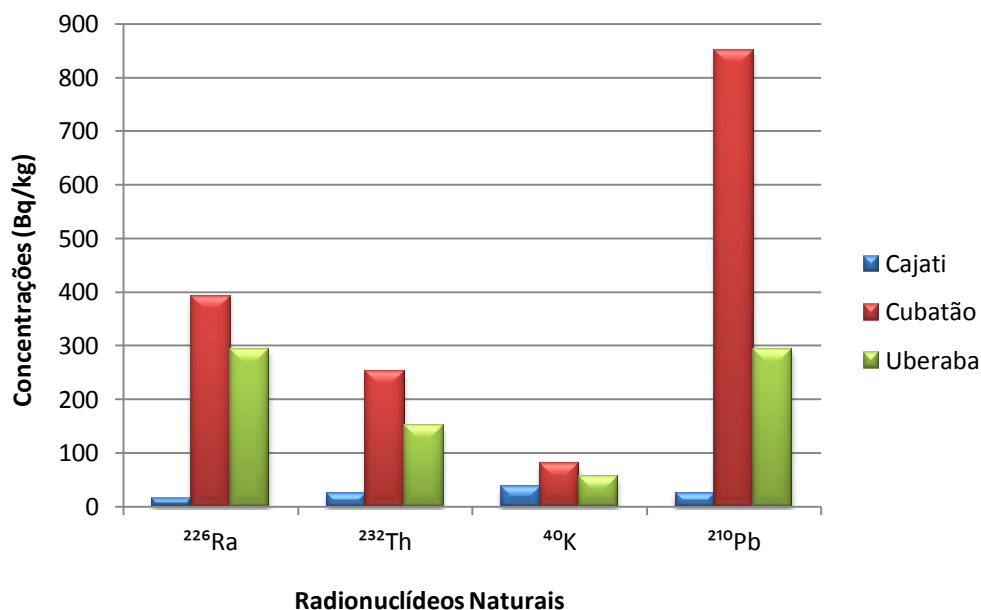
A unidade de medida da concentração de radionuclídeos naturais é o Becquerel por quilograma ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ ).

**Tabela 2.6 - Concentração de radionuclídeos naturais do fosfógeno de três procedências do Brasil**

Concentração( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )				
Amostras	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{210}\text{Pb}$
Cajati	$15,9 \pm 0,5$	$26,1 \pm 2,6$	< 39	$26,4 \pm 7,1$
Cubatão	$392 \pm 10$	$253 \pm 3$	< 81	$852 \pm 138$
Uberaba	$294 \pm 3$	$151 \pm 6$	< 56	$295 \pm 16$

(Fonte: Adaptado de VILLAVERDE, 2008)

**Figura 2.9 - Concentrações de radionuclídeos naturais em fosfogesso de três procedências do Brasil**



(Fonte: Adaptado de VILLAVERDE, 2008)

Segundo VILLAVERDE (2008), o fosfogesso analisado das três procedências não provoca um incremento significativo de dose efetiva na população e os riscos podem ser considerados desprezíveis.

O fosfogesso foi classificado pela CNEN como rejeito de baixo nível de radioatividade (FERNANDES et al., 2010).

Em 2011 foi publicada a resolução da CNEN Nº 113 que dispõe sobre o nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira, estabelecendo que o nível de isenção de controle regulatório para tais usos é de 1000 Bq.kg<sup>-1</sup> para os radionuclídeos <sup>226</sup>Ra ou <sup>228</sup>Ra.

### 2.1.6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FOSFOGESSO

O fosfogesso hemidratado e o gesso mineral são similares em sua composição química, com níveis de sulfato de cálcio bem próximos, conforme Tabela 2.7 (CANUT, 2006). Vale salientar, que o fosfogesso possui outros componentes em pequena quantidade, dependendo da rocha fosfática que o originou. Entre esses componentes destacam-se os fluoretos, fosfatos, matéria orgânica e minerais como Alumínio e Ferro (RABELO et al. 2001).

**Tabela 2.7 - Análise da composição química do fosfogesso**

Elementos	Fosfogesso hemidratado (%)	Gesso Mineral (%)
<b>O</b>	31,50	32,64
<b>Si</b>	0,78	-
<b>P</b>	1,33	-
<b>S</b>	29,11	29,21
<b>Ca</b>	37,48	38,16
<b>Total</b>	100%	100%

(Fonte: Adaptado de CANUT, 2006)

Os resultados apresentados por CANUT (2006), descritos na Tabela 2.7, demonstram que o teor de cálcio, enxofre e oxigênio contidos na amostra de fosfogesso se assemelham aos da amostra de gesso mineral, diferenciando apenas nas pequenas quantidades percentuais de silício e fósforo existentes na amostra de fosfogesso.

Quanto à caracterização química do fosfogesso, OLIVEIRA (2008), obteve resultados que estão apresentados na Tabela 2.8, revelando a presença predominante de cálcio (25,2%) e enxofre (16,6%), podendo o fosfogesso ser utilizado também como um corretivo do solo, atuando na diminuição da acidez potencial. Os outros elementos e substâncias analisadas apresentaram em níveis percentuais abaixo de 1%, sendo considerados elementos traço. A porcentagem de água existente na composição química da amostra foi de 15%.

**Tabela 2.8 - Caracterização química do fosfogesso**

Elementos e Compostos	(%)
S	16,6
Ca	25,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (total)	0,97
H <sub>2</sub> O (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,22
Fe	0,29
Al	< 0,01
K	< 0,01
SiO <sub>2</sub>	0,99
SrO	0,033
NbO	0,013

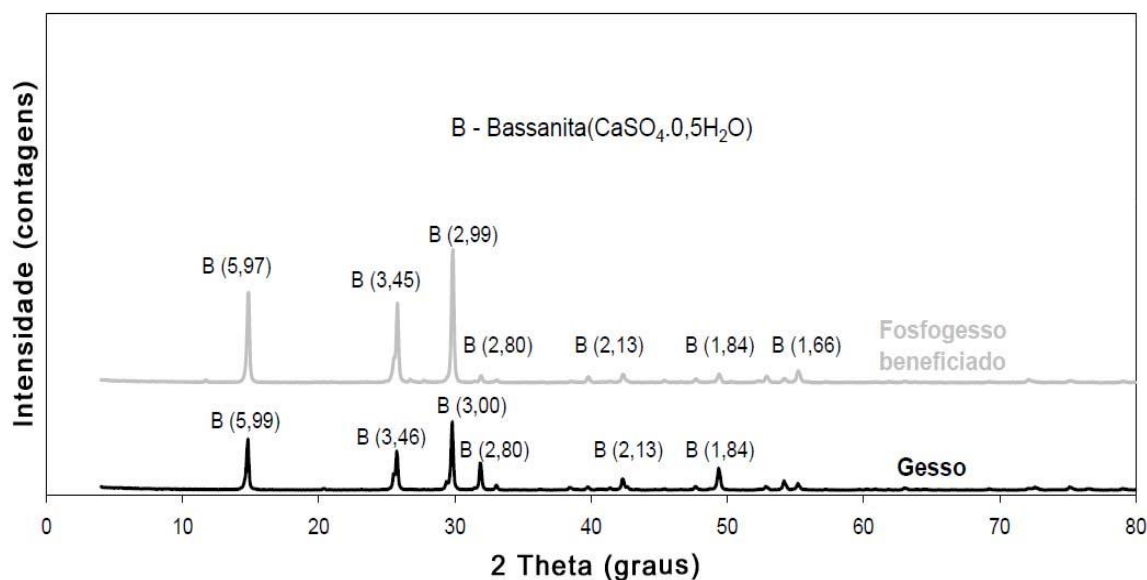
<b>Tabela 2.8 - Continuação</b>	
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0,012</b>
H <sub>2</sub> O	15,0

(Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2008)

### 2.1.7 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DO FOSFOGESSO

Segundo CANUT (2006), a partir da difração de raios X foi possível efetuar uma análise mineralógica das amostras de fosfogesso e gesso, cujo resultado pode ser observado na Figura 2.10.

**Figura 2.10 – Espectro de difração das amostras de fosfogesso e gesso**



(Fonte: Adaptado de CANUT, 2006)

CANUT (2006) observou que a microestrutura da amostra de gesso e de fosfogesso possuem picos bem definidos do mineral bassanita (sulfato de cálcio hemidrato) e a coincidência dos picos do gesso e do fosfogesso beneficiado.

### 2.1.8 APLICAÇÕES ATUAIS

Uma das aplicações para o fosfogesso, por ser um sal neutro, tem sido sua utilização como fonte de cálcio para o solo. Entretanto, essa aplicação é pouco significativa se comparada à geração do fosfogesso, tornando atrativa a busca por outras aplicações para o consumo desse resíduo industrial.

As Figuras 2.11 e 2.12 ilustram as aplicações atuais para o fosfogesso.

**Figura 2.11- Aplicação atual para o fosfogesso – gesso agrícola**



(Fonte: <<http://zip.net/bpnmcR>>. Acesso em: 17/09/2013)

**Figura 2.12 - Aplicação atual para o fosfogesso – gesso agrícola**



(Fonte:<[http://www.nutrition.com.br/Nutrition\\_Gesso.asp](http://www.nutrition.com.br/Nutrition_Gesso.asp)>. Acesso em: 17/09/2013)

O fosfogesso, como gesso agrícola, não possui valor neutralizante, mas pode ser utilizado como fonte de cálcio, já que é enorme a extensão de solos ácidos no Brasil, principalmente em vegetação de cerrado, onde é frequente a deficiência de cálcio.

### **2.1.9 DISPOSIÇÃO E DESCARTE**

No Brasil são geradas anualmente quase 12 milhões de toneladas e estima-se que haja mais de 160 milhões de toneladas de fosfogesso dispostas em aterros a céu aberto, sem destinação adequada e compatível ao volume gerado, o que

representa um grande passivo ambiental e que se agrava, progressivamente, com a necessidade do aumento da produção de alimentos.

O descarte do fosfogesso no ambiente é um problema complexo e envolve questões de natureza econômica, ambiental e legislativa.

Segundo SCHULTZ et al. (1991), as alternativas de descarte utilizadas são a disposição em pilhas próximo às fábricas ou o lançamento em rios e oceanos, contudo, a segunda alternativa não é politicamente e ecologicamente correta.

A disposição de fosfogesso em aterros a céu aberto também é um problema que preocupa outros países, como os Estados Unidos da América, onde há cerca de 1 bilhão de toneladas de fosfogesso empilhados em 25 pilhas na Flórida. Anualmente nos Estados Unidos são geradas cerca de 30 milhões de toneladas de fosfogesso, porém altamente radioativo (FIPR, 2012).

Pode ser observado nas Figuras 2.13 (Uberaba – Brasil) e 2.14 (Florida – USA), que independente do país ou do tipo de fosfogesso gerado, as soluções encontradas para esse resíduo são idênticas: armazenamento em aterros a céu aberto.

**Figura 2.13 - Aterro de fosfogesso a céu aberto (Uberaba - Brasil)**



(Fonte: <[http://www.nutrition.com.br/Nutrition\\_Gesso.asp](http://www.nutrition.com.br/Nutrition_Gesso.asp)>. Acesso em: 20/09/2012)

**Figura 2.14 - Aterro de fosfogesso a céu aberto (Florida- USA)**



(Fonte: <<http://zip.net/bnnINR>>. Acesso em: 20/09/2012)

O empilhamento do fosfogesso no solo pode provocar impactos ambientais devido a água ácida, fluoretos e radionuclídeos. As enormes pilhas de fosfogesso causam também um grande impacto visual.

Além da disposição no solo, em alguns países, quando o fosfogesso não é armazenado a céu aberto, ele é descartado de forma indevida através do bombeamento para rios ou oceanos. (FREITAS, 1992<sup>3</sup> *apud* CANUT, 2006). Essa não é uma prática comum, principalmente pelos danos ambientais provocados.

Marrocos é um dos maiores produtores mundiais de ácido fosfórico e também um dos maiores geradores mundiais de fosfogesso, e a forma predominante utilizada para o descarte é a mistura do fosfogesso com a água do mar e em seguida lançado, através de bombeamento, no Oceano Atlântico (WISSA et al., 2002). A Figura 2.15 ilustra a principal forma utilizada em Marrocos para o descarte do fosfogesso.

---

<sup>3</sup> FREITAS, J. B de. A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, MG, 1992. Anais, p. 325-339.



**Figura 2.15 - Mistura do fosfogesso com a água do mar e bombeamento para o Oceano Atlântico (Marrocos)**



(Fonte: <<http://zip.net/bnnlN0>>. Acesso em: 20/01/2014)

No Brasil, outra forma em estudo para o descarte do fosfogesso é a sua disposição em aterros sanitários. Entretanto, o alto custo envolvido nessa forma de descarte tem inviabilizado sua utilização pelas empresas geradoras. A Figura 2.16 ilustra o descarte do fosfogesso em aterros sanitários.

**Figura 2.16 - Descarte de fosfogesso em aterros sanitários**



(Fonte: <<http://zip.net/brnl4M>>. Acesso em: 20/09/2012)



A forma mais adequada para o descarte do fosfogesso é estocá-lo próximo da localização das fábricas de ácido fosfórico, mas isso depende da disponibilidade e do custo destas áreas e também da legislação ambiental vigente.

Existem duas formas para se estocar o fosfogesso: forma úmida ou forma seca.

Segundo FREITAS (1992)<sup>4</sup> *apud* CANUT (2006), a disposição final realizada de forma úmida é a mais comum, onde o fosfogesso é descartado juntamente com a água residual da unidade industrial, na forma de polpa, através de bombeamento para lagoas de sedimentação, onde ele é decantado, e depois de seco é acumulado em pilhas em áreas especialmente destinadas para tal, conforme ilustrado na Figura 2.17.

**Figura 2.17 - Descarte de fosfogesso em Uberaba – MG**



(Fonte: <<http://zip.net/brnl6M>>. Acesso em: 05/06/2013)

As lagoas de sedimentação são construídas e limitadas pelo próprio fosfogesso. A água ácida, resultante da utilização nos filtros, é separada e drenada para lagoas chamadas de “lagoas pulmões”.

---

<sup>4</sup> FREITAS, J. B de. A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, MG, 1992. Anais, p. 325-339.

## 2.2 GESSO MINERAL

Gesso é a denominação dada ao aglomerante inorgânico obtido pela desidratação total ou parcial da rocha gipsita.

Segundo DA ROCHA (2007), o gesso é um dos materiais de construção mais antigos a ser utilizado pela humanidade, assim como a cal e a terracota.

Em recentes descobertas arqueológicas, tornou-se evidente que o emprego do gesso remonta entre o 8º e o 6º milênio a.C. (ruínas na Síria, Turquia e Jericó), onde as argamassas em gesso e cal serviram de suporte em afrescos decorativos, na fabricação de pisos e recipientes em geral.

Em 2.800 a.C, na construção da Pirâmide de Quéops, rei do Egito, o gesso foi usado em juntas de assentamento estanques.

Em 300 a.C, Theophraste, discípulo de Platão, cita a existência de gesseiras em Chipre, Fenícia e Síria. Nesse período o gesso era utilizado como argamassa e ornamentação.

Entre os séculos XII e XVIII, a região Parisiense utilizou o gesso em larga escala na produção de argamassas e decoração, período conhecido como barroco e responsável pelo gesso também ser conhecido na literatura como "*plaster of Paris*".

Em 1768, Lavoisier apresentou o primeiro estudo científico dos fenômenos básicos para a preparação do gesso. E, a partir do século XX, com a evolução industrial, os equipamentos para fabricação do gesso começaram a ter maior tecnologia, aumentando assim a variedade dos seus produtos.

Atualmente, os maiores produtores mundiais de gipsita são: Estados Unidos da América (15,9%), Irã (10,0%), Canadá (8,6%), Tailândia (7,3%), Espanha (6,8%) e China (6,8%). O Brasil possui a maior reserva mundial (1,2 bilhões de toneladas), mas só contribui com 1,4% da produção mundial (LYRA SOBRINHO et al., 2006).

No Brasil, as reservas de gipsita são encontradas em jazidas no Nordeste e Norte, sendo estimadas em 407 milhões de toneladas.

O Pólo Gesseiro do Estado de Pernambuco é responsável por 89,4% da produção de gipsita e por 81% da produção brasileira de gesso (LYRA SOBRINHO et al., 2006).

As jazidas do Araripe, envolvendo os Municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade, possuem reservas abundantes de gipsita e são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo e apresentam excelentes condições de mineração (BALTAR et al., 2006).

A Figura 2.18 ilustra a lavra de gipsita no Pólo Gesseiro de Pernambuco e a Figura 2.19 um fragmento da rocha gipsita da região do Araripe (PE).

**Figura 2.18 - Lavra de gipsita no Pólo Gesseiro de Pernambuco (PE)**



(Fonte: Adaptado de BALTAR et al., 2008)

**Figura 2.19 - Fragmento de rocha gipsita da região do Araripe (PE)**



(Fonte: Autor, 2013)

Em 2005 a produção brasileira de gipsita bruta foi de 1,58 milhões de toneladas. Estima-se que 60% foram calcinadas para a produção de gesso, 34% foram usadas na forma natural para produção de cimento e 6% utilizada como corretivo de solos (LYRA SOBRINHO et al., 2006).

Segundo JOHN e CINCOTTO (2003), o gesso é basicamente um sulfato de cálcio, mais ou menos impuro, hidratado com duas moléculas de água. Sua fórmula química é  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e suas impurezas, que, no máximo, indicam 6%, são o silício ( $\text{SiO}_2$ ), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), a cal ( $\text{CaO}$ ), o anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ) e o anidrido carbônico ( $\text{CO}_2$ ).

Para a produção do gesso utilizado na construção civil, as rochas de gipsita depois de britadas e trituradas, são desidratadas à temperatura entre 120 e 160°C. Nessa temperatura, a gipsita perde uma molécula e meia de sua água, passando de di-hidrato para hemidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ).

Segundo BALTAR et al. (2008), a forma natural da gipsita é amplamente utilizada na fabricação de cimento portland e na agricultura. Na indústria cimenteira, a gipsita é adicionada ao clínquer durante a moagem, na proporção de 2 a 5%, para retardar o tempo de pega do cimento. Na agricultura, a gipsita pode atuar como: (i) agente corretivo de solos ácidos, como fonte de cálcio; (ii) como fertilizante em culturas específicas como amendoim, batatas, legumes e algodão e (iii) como condicionador de solos, aumentando a permeabilidade, a aeração, a drenagem, a penetração e retenção da água.

A utilização do gesso hemidrato pode ser dividida em dois grandes grupos: o gesso para construção civil e o gesso industrial (BALTAR et al., 2008).

Segundo BALTAR et al. (2008), o gesso para construção civil é obtido a partir de um minério com grau de pureza superior a 75%, e a calcinação produz um hemidrato  $\beta$  (beta) que, dependendo do processo, pode ser do tipo A (gesso de fundição) ou do tipo B (gesso de revestimento). A partir desses tipos de gesso são obtidos diferentes produtos:

- (a) gesso de fundição utilizado para a confecção de pré-moldados (fabricados simplesmente com gesso ou como placas de gesso acartonado);

- (b) placas para rebaixamento de tetos, com produção artesanal ou em plantas modernas com máquinas automáticas com sistemas de alimentação de pasta;
- (c) blocos para paredes divisórias;
- (d) gesso para isolamento térmico e acústico (produto misturado com vermiculita ou perlita);
- (e) gesso para portas corta fogo;
- (f) gesso de revestimento de aplicação manual, utilizado para paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento;
- (g) gesso de projeção, para aplicação mecanizada de revestimento de parede;
- (h) gesso com pega retardada, para aplicação de revestimento manual;
- (i) gesso cola, para rejunte de pré-moldados em gesso.

O gesso industrial é um produto de maior pureza e valor agregado, podendo ser obtido a partir dos hemidratos  $\alpha$  (alfa) ou  $\beta$  (beta), dependendo da sua aplicação:

- (a) Cerâmica: A pasta obtida a partir da reidratação do hemidrato  $\alpha$  (ou mistura de hemidratos  $\alpha$  e  $\beta$ ) tem importante uso na produção de moldes e matrizes para enchimento com barbotinas na produção de porcelana, cerâmica sanitária, grés etc. Na preparação dos moldes costuma-se formar uma mistura com 78 a 90 partes de água para 100 partes de gesso;
- (b) Indústria do Vidro: O gesso é utilizado como fonte de cálcio e de enxofre em substituição ao sulfato de sódio;
- (c) Carga Mineral: O gesso tem sido utilizado como carga de alta qualidade ou diluente na fabricação de papel, plásticos, adesivos, tintas, madeira, têxteis e alimentos entre outros materiais. Algumas das características do gesso são importantes para esse uso como: inércia química; pouca abrasividade; baixo preço; baixo peso específico; alto índice de refração; absorção de óleo adequada; elevado grau de brancura; poder opacificante; baixa demanda de ligantes e compatibilidade com pigmentos e outras cargas minerais. Em geral, o gesso carga é produzido a partir do hemidrato do tipo  $\beta$ . No caso do uso na indústria do papel, o gesso confere ao papel uma estrutura aberta e porosa, o que resulta em elevada absorção de tinta e rápida secagem. O uso da gipsita como carga mineral, em outros países, representa um importante mercado consumidor para o produto beneficiado;

- (d) Indústria Farmacêutica: O gesso possui características favoráveis ao uso farmacêutico, como facilidade de compressão e desagregação. Por isso, é utilizado como diluente em pastilhas prensadas e cápsulas ou na preparação de moldes. O gesso para uso farmacêutico tem elevado valor comercial, devendo atender às normas e especificações exigidas para produtos de alimentação e remédios;
- (e) Decoração: Utilizado para confecção de elementos decorativos como estatuetas e imagens, sendo obtido a partir do gesso  $\beta$  (beta) de fundição;
- (f) Escolar (giz): Utilizado em salas de aula e produzido a partir do gesso  $\beta$  (beta) de fundição, com o uso de aditivos;
- (g) Ortopédico: Obtido a partir do gesso  $\alpha$  (alfa), após a adição de produtos químicos;
- (h) Dental: Usados para confecção de moldes e modelos. Pode ser dos tipos III e IV. Ambos obtidos a partir do gesso  $\alpha$  (alfa), após a adição de produtos químicos. O gesso dental do tipo IV constitui-se no produto mais nobre do gesso, apresentando elevada resistência mecânica, excelente trabalhabilidade, baixa consistência e menor expansão;
- (i) Bandagens de alta resistência: Produto obtido a partir do gesso  $\alpha$  (alfa);
- (j) Outros Usos: Indústria automobilística, fabricação de fósforos, fabricação de cerveja, indústria eletrônica etc.

A obtenção de cada uma dessas variedades de produto requer condições específicas com relação ao tipo de gipsita, tipo de forno, condições de calcinação e tratamento posterior.

Segundo DA ROCHA (2007), o preço do gesso hemidrato  $\alpha$  (alfa) é cerca de seis vezes maior que o hemidrato  $\beta$  (beta).

### **2.2.1 GESSO BETA**

Quando a gipsita é calcinada em caldeira, cuba ou forno rotatório aberto (exposto ao ar), a temperaturas de 120 a 160°C, o produto terá cristais caracterizados pelas formas irregulares e esponjosos, denominado de hemidrato  $\beta$  (beta).

O gesso  $\beta$  é mais utilizado na produção de componentes pré-moldados destinados à construção civil.

### **2.2.2 GESSO ALFA**

Quando a gipsita é calcinada sob pressão de vapor d'água, em autoclave, a temperaturas de 120 a 160°C, o produto terá cristais mais densos e caracterizados pelas formas mais regulares e prismática, denominado de hemidrato  $\alpha$  (alfa).

O gesso  $\alpha$ , por sua maior pureza e resistência mecânica é mais utilizado na odontologia, principalmente na confecção de diversos tipos de modelos protéticos e ortodônticos, na produção de porcelanas, cerâmicas sanitárias, na indústria farmacêutica, em elementos decorativos como estatuetas e também na composição de revestimentos refratários.

## **2.3 TEMPERATURA E TEMPO DE CALCINAÇÃO**

A calcinação é um processo de tratamento térmico, na presença de ar ou oxigênio, aplicado para minérios e outros materiais sólidos para produzir uma decomposição térmica, transição de fase, ou a remoção de uma fração volátil, objetivando uma melhora na condutividade elétrica, remoção de água ou de determinadas impurezas. O processo normalmente acontece a temperaturas inferiores ao ponto de fusão dos materiais processados (JEPSON e CRAIG, 2005).

O processo utiliza temperaturas elevadas, entre 800 e 1.000 graus Celsius ou superior, com o objetivo de alterar as propriedades físicas e químicas de diversos materiais sólidos.

O termo foi originalmente aplicado no método para liberação de dióxido de carbono, a partir de calcário, para obtenção de cal (óxido de cálcio), um dos processos mais antigos e comuns de calcinação. A calcinação também é utilizada para extrair metais de minérios, e em algumas unidades de reciclagem é utilizado o processo de calcinação para reciclar resíduos de produtos metálicos.

Embora o termo calcinação seja usado para se referir ao processo envolvendo o cálcio, ele também é “emprestado” para descrever processos semelhantes, mesmo não envolvendo o cálcio, mas que utilizam temperaturas elevadas. Por exemplo, a argila após ter toda sua água removida pela calcinação, transforma-se em anidro, que é aproveitado como um abrasivo em diferentes tipos de revestimentos.

Basicamente, a calcinação é empregada de maneira ampla e descreve o tratamento térmico aplicado a quaisquer substâncias sólidas visando os seguintes objetivos:

- A remoção de uma fase volátil quimicamente ligada a um determinado sólido;
- A decomposição térmica (de uma ligação química);
- A produção de um óxido (quimicamente semelhante à cal);
- A mudança de uma estrutura em substâncias cristalinas.

## **2.4 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

A utilização de resíduos industriais na fabricação de produtos na área da construção civil cresce a cada dia, fazendo com que diminua o impacto ambiental desses resíduos, reduzindo também o consumo de recursos naturais e diminuindo o custo de produção.

Segundo ÂNGULO et al. (2001)<sup>5</sup> *apud* ARAÚJO e FERNANDES (2013), a construção civil chega a consumir até 75% de recursos naturais, justificando as pesquisas para a utilização de resíduos industriais na construção civil.

Segundo MELO e SILVA (2013), os resultados obtidos em sua pesquisa comprovam a viabilidade do uso do fosfogesso em cerâmicas, podendo o material ser empregado na fabricação de tijolos maciços de categorias A, B e C ou blocos de alvenaria de classes 10, 15, 25 e 60.

---

<sup>5</sup> ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, IBRACON/CT- 206 MEIO AMBIENTE. Brasil, São Paulo, junho, 2001. p. 43-56.



Na Flórida (EUA) há mais de um bilhão de toneladas de fosfogesso empilhado em duas dezenas de locais distintos e, a cada ano, são acrescentadas mais 30 milhões de toneladas (FIPR, 2012), e a única destinação que a Agência de Proteção Ambiental – US EPA (United States Environmental Protection Agency) permite é estocá-lo, em função da radioatividade existente no fosfogesso americano estar acima do permitido para o uso humano, diferente do fosfogesso brasileiro. Contudo, apesar das limitações rigorosas estabelecidas pela US EPA, o fosfogesso americano tem sido utilizado na pavimentação de algumas estradas (LAPIDO-LOUREIRO et al., 2008).

Em alguns países onde há escassez de jazidas de gipsita, como no Japão, por exemplo, o fosfogesso tem sido utilizado para substituir o gesso mineral na produção de artefatos para a construção civil (BARTI e ALBUQUERQUE, 1992).

No Brasil, em algumas fábricas de cimento das regiões sul e sudeste, o fosfogesso tem substituído a gipsita, sendo adicionado ao clínquer, durante a moagem, na proporção de 2 a 5%, para retardar o tempo de pega do cimento (LYRA SOBRINHO et al., 2004). As principais vantagens de utilizar o fosfogesso como matéria prima na fabricação de cimento são econômicas e ambientais.

Em 2005 o Prof. Dr. Milton Ferreira de Souza, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC-USP), construiu uma edificação-protótipo com aproximadamente 60 m<sup>2</sup> em fosfogesso (Figura 2.20), onde a sala e dois quartos foram construídos com placas produzidas com fosfogesso de três regiões diferentes do Brasil, as principais geradoras: Cajati e Cubatão no Estado de São Paulo e Uberaba no Estado de Minas Gerais. Este protótipo teve uma grande contribuição científica, pois durante 5 anos, de 2005 a 2010, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) monitoraram a radioatividade dos três ambientes, substituindo mensalmente os detectores de radioatividade nesse período. Os resultados deste trabalho serviram para a produção de diversas pesquisas científicas no IPEN e na CNEN, principalmente para comprovar as diferenças entre o fosfogesso gerado a partir de rochas magmáticas e de rochas sedimentares, e também para demonstrar a viabilidade técnica do fosfogesso gerado no Brasil como material a ser utilizado na construção civil, por ele não causar nenhum dano à saúde.

**Figura 2.20 - Protótipo construído em São Carlos (SP) com placas de fosfogesso**



(Fonte: Milton Ferreira de Souza, 2010)

Os resultados dos ensaios de resistência mecânica à compressão dos corpos de prova em fosfogesso e gesso mineral, obtidos por CANUT (2006), para as idades de 7, 14, 21 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 2.9 e representados nos gráficos da Figura 2.21.

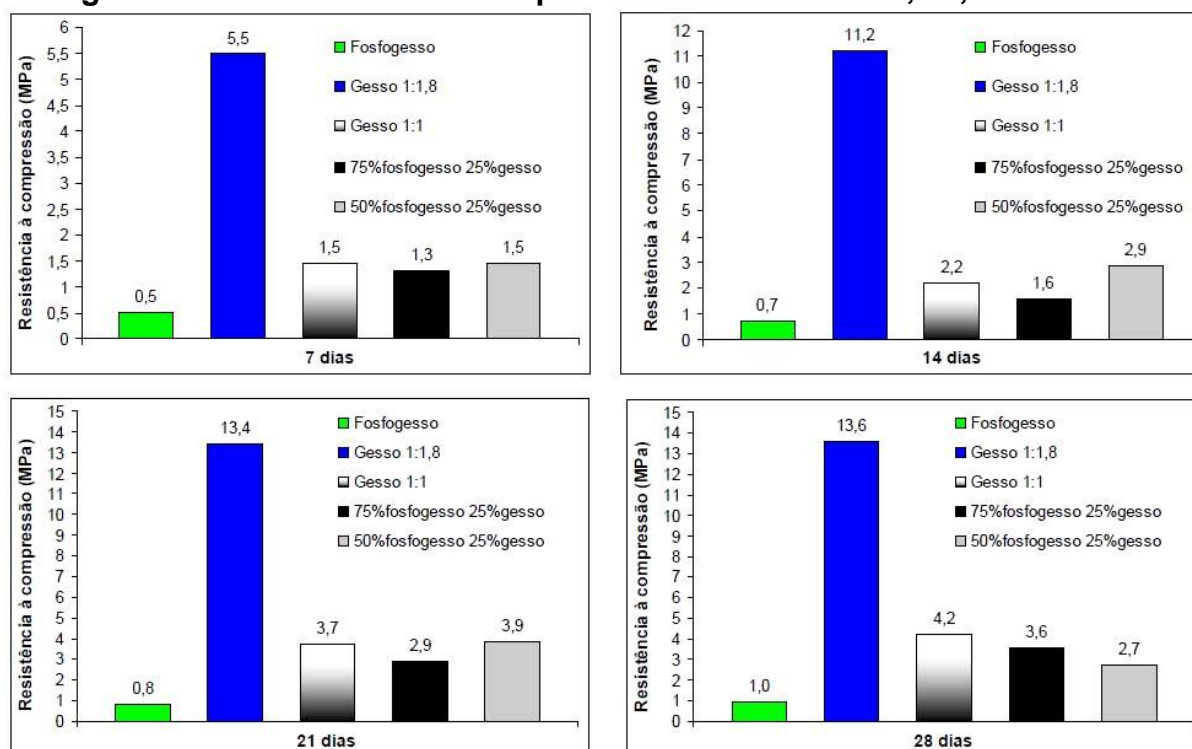
**Tabela 2.9 – Resistência à compressão axial das composições**

Dias	Fosfogesso		Gesso 1:1,8		Gesso 1:1,0		75% fosfogesso 25%gesso		50% fosfogesso 50%gesso	
	Tensão	Disp.*	Tensão	Disp.*	Tensão	Disp.*	Tensão	Disp.*	Tensão	Disp.*
	média (MPa)	média (%)	média (KN)	média (%)	média (KN)	média (%)	média (KN)	média (%)	média (KN)	média (%)
7	0,48		5,84		1,46		1,22		1,46	
	0,55	9,00	5,13	9,00	1,43	1,00	1,37	7,00	1,43	1,00
	0,51		5,50		1,46		1,30		1,46	
14	0,77		11,42		2,13		1,55		2,96	
	0,66	10,00	11,28	3,00	2,38	8,00	1,66	5,00	2,62	11,00
	0,75		10,95		2,10		1,59		3,08	
21	0,85		14,03		3,75		2,93		3,66	
	0,82	4,00	12,95	5,00	3,73	1,00	3,01	4,00	4,01	6,00
	0,80		13,30		3,70		2,85		3,94	
28	0,96		13,06		4,33		3,45		2,73	
	1,01	5,00	14,14	5	4,24	4,00	3,75	5,00	2,63	6,00
	0,94		13,46		4,09		3,64		2,88	

\* Dispersão média entre os resultados obtidos para os 6 corpos de prova confeccionados, sendo que a dispersão máxima, proposta por norma, é de 15% entre os resultados.

(Fonte: CANUT, 2006)

**Figura 2.21 – Resistência à compressão nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias**



(Fonte: Adaptado de CANUT, 2006)

Analisando a Tabela 2.9 e os gráficos da Figuras 2.21, verifica-se que a maior resistência mecânica à compressão para os corpos de prova confeccionados somente com fosfogesso, foi de 1,01 MPa, para a idade de 28 dias, enquanto que para os corpos de prova confeccionados somente com gesso mineral foi de 14,14 MPa, também para a idade de 28 dias.

## 2.5 APLICAÇÕES DO FOSFOGESSO EM ATERROS SANITÁRIOS

Outra alternativa para se aproveitar o fosfogesso, além de condicionador de solo e na construção civil, é a utilização em aterros sanitários.

A utilização do fosfogesso em aterros sanitários ainda é pequena, contudo, os estudos que existem comprovaram que devido ao alto teor de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) presente no fosfogesso, quando utilizado em ambientes anaeróbicos, como no caso de aterros sanitários, ele tem capacidade de acelerar o processo de decomposição de matérias orgânicas por servir de alimento para as bactérias decompositoras, aumentando assim a vida útil do aterro (ARAÚJO e FERNANDES, 2013).

Estudo realizado pela Universidade de Orlando (EUA), em parceria com o FIPR (Florida Institute of Phosphate Research), o resultado encontrado foi que o fosfogesso reduz o volume de resíduo sólido em até 50% sem trazer nenhum risco ao meio ambiente e nem à saúde humana (VALE FERTILIZANTES, 2010).

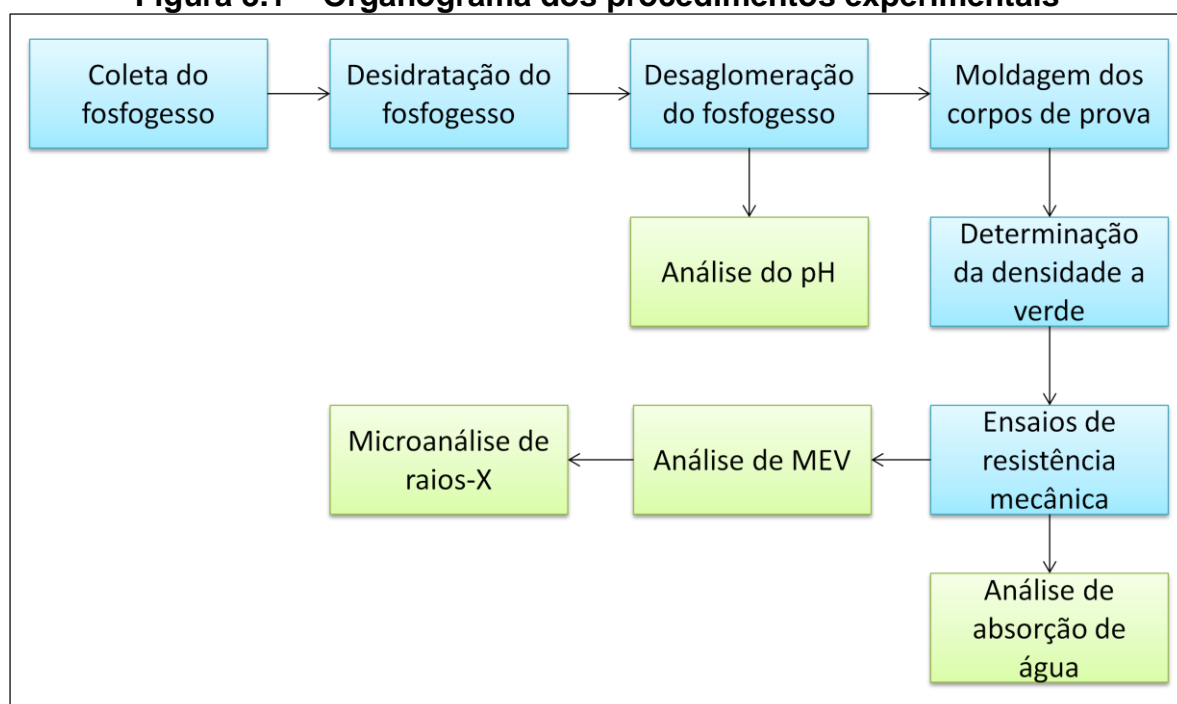
Estudo realizado no aterro sanitário de Uberlândia - MG, foi analisado o comportamento de contaminantes radioativos naturais e metais no aquífero em decorrência da aplicação do fosfogesso como cobertura de aterros sanitários, sendo analisada em laboratório a determinação da proporção ideal de mistura resíduo sólido urbano/fosfogesso a ser aplicada no aterro sanitário, visando o aumento da sua vida útil. A conclusão foi de que, mesmo no cenário mais conservador de liberação dos contaminantes pelo fosfogesso, não apresentou risco à saúde humana nem ao meio ambiente quando aplicado como cobertura de aterros sanitários. Todos os resultados das análises ficaram abaixo do limite recomendado pelo Ministério da Saúde (ARAÚJO e FERNANDES, 2013).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para a avaliação da possibilidade de utilização do fosfogesso na construção civil, com a avaliação de suas propriedades mecânicas e físicas.

A Figura 3.1 ilustra o organograma com as principais atividades desenvolvidas nessa pesquisa.

**Figura 3.1 – Organograma dos procedimentos experimentais**



(Fonte: Autor, 2014)

A seguir estão discriminados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, tais como, a coleta e preparo do fosfogesso, moldagem dos corpos de prova, descrição dos ensaios realizados para a avaliação mecânica, análise granulométrica e de pH dos materiais empregados.

### **3.1 MATERIAIS**

Os materiais empregados nos ensaios e na confecção dos corpos de prova foram: fosfogesso; gesso mineral; e água.

#### **3.1.1 FOSFOGESSO**

A indústria agrícola utiliza grandes quantidades de fertilizantes químicos à base de fósforo para reabastecer e complementar os nutrientes necessários para o crescimento das plantas. A demanda mundial por fertilizantes e aditivos para alimentação animal correspondem aproximadamente a 95% de 8 a 10 milhões de toneladas de ácido fosfórico a cada ano. Contudo, a produção de cada tonelada de ácido fosfórico, por via úmida, é acompanhada pela geração de 4 ½ toneladas de sulfato de cálcio di-hidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), conhecido como fosfogesso.

O fosfogesso, na maioria das vezes, é armazenado em grandes pilhas a céu aberto que ocupam centenas de hectares.

#### **3.1.2 GESSO MINERAL**

O gesso mineral utilizado para servir como parâmetro para a pesquisa foi o gesso de fundição, composto basicamente por um hemidrato do tipo  $\beta$  (beta), utilizado na produção industrial ou artesanal de componentes pré-moldados de gesso, destinados à construção civil, como placas, blocos ou elementos decorativos, como molduras e sancas e foi adquirido em loja especializada em materiais de construção civil de São Carlos, SP.

#### **3.1.3 ÁGUA**

A água utilizada para hidratar o fosfogesso e produzir os corpos de prova foi fornecida pelo serviço autônomo de água e esgoto de São Carlos, SP, e é considerada própria para o consumo na atividade da construção civil.

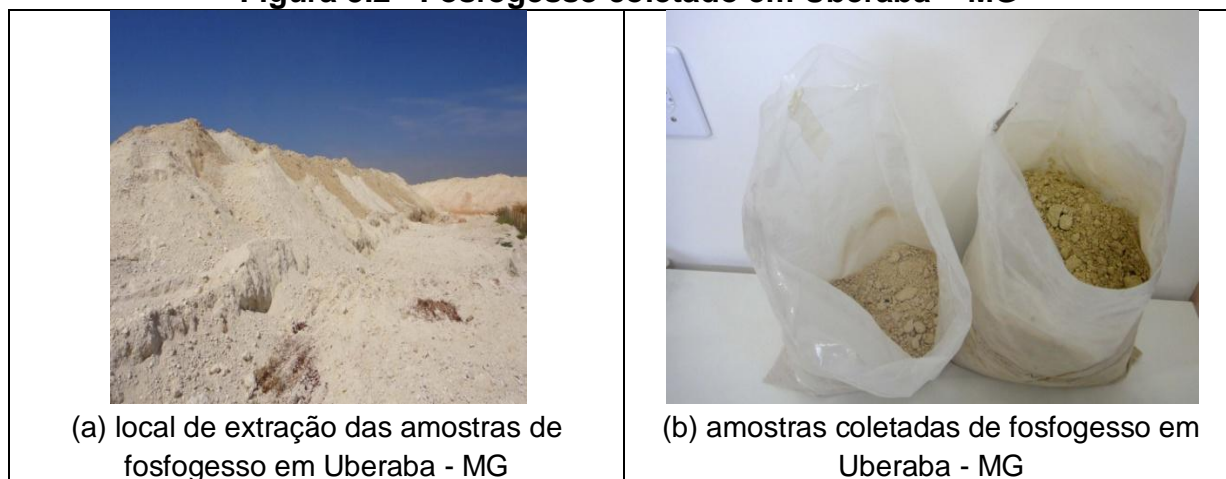
## 3.2 MÉTODOS

A seguir, apresenta-se uma descrição dos métodos empregados para coleta, desidratação e desaglomeração do fosfogesso, moldagem dos corpos de prova, bem como os ensaios e análises realizadas.

### 3.2.1 COLETA DO FOSFOGESSO

As amostras analisadas nessa pesquisa foram fornecidas pela empresa Vale Fertilizantes S.A. de Uberaba, MG, e coletadas em aterro próximo à empresa. Na Figura 3.2 pode ser observado o local e as amostras coletadas.

**Figura 3.2 - Fosfogesso coletado em Uberaba – MG**



(Fonte: Autor, 2012)

Estima-se que em Uberaba já possui mais de 65 milhões de toneladas de fosfogesso armazenado a céu aberto.

### 3.2.2 DESIDRATAÇÃO DO FOSFOGESSO

As amostras coletadas do fosfogesso di-hidratado foram pesadas e desidratadas em estufa, em diferentes temperaturas, que variaram entre 120 e 180°C, e tempos que variaram entre 60 e 150 minutos, conforme sequência apresentada na Figura 3.3.

Para cada amostra a ser calcinada foram pesados 150g de fosfogesso di-hidratado.



**Figura 3.3 - Sequência do processo de desidratação do fosfogesso di-hidratado**



(Fonte: Autor, 2013)

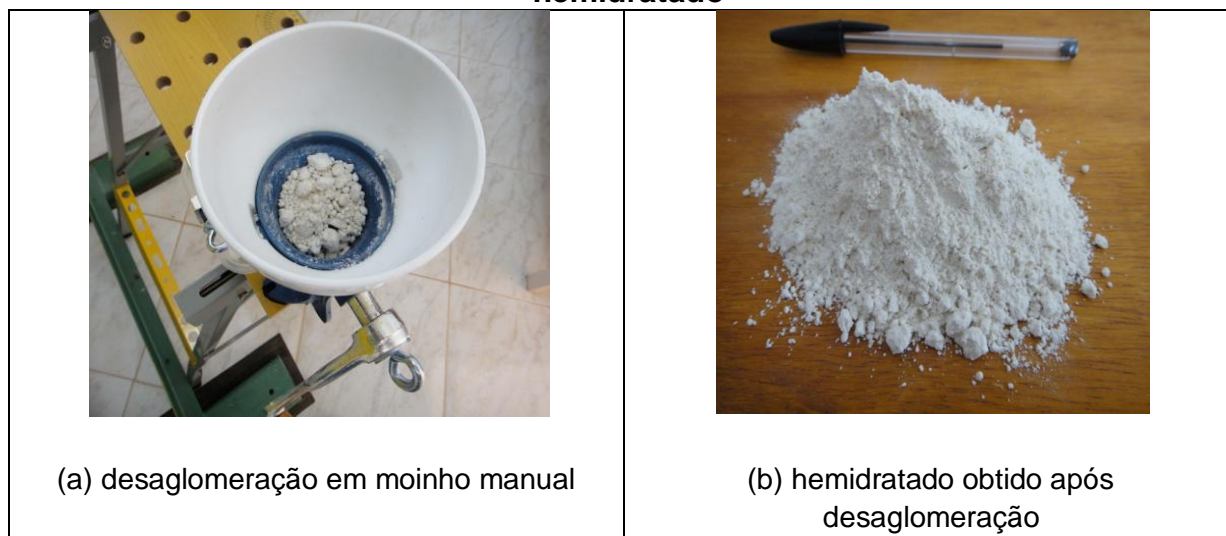
Optou-se por secar previamente a água livre contida nas amostras de fosfogesso di-hidratado, em estufa a 100°C por 60 minutos, em função do seu armazenamento a céu aberto, para que a umidade diferente entre as amostras não influenciasse nos resultados.

### **3.2.1 DESAGLOMERAÇÃO DO FOSFOGESSO**

A desaglomeração do fosfogesso hemidratado foi realizada com o auxílio de um moinho manual, conforme a sequência do processo apresentada na Figura 3.4.



**Figura 3.4 - Sequência do processo de desaglomeração do fosfogesso hemidratado**



(Fonte: Autor, 2013)

Outra alternativa para a desaglomeração do fosfogesso hemidratado seria a utilização de uma peneira com determinada malha para homogeneizar a distribuição granulométrica.

### **3.2.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DE FOSFOGESSO**

- Módulo de finura

Segundo a norma NBR NM 248 (2003), o módulo de finura (MF) de um agregado se determina pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100. O módulo de finura é uma grandeza adimensional e deve ser apresentado com aproximação de 0,01.

O módulo de finura de um agregado é maior quanto maior forem as partículas deste agregado.

O módulo de finura pode ser utilizado para se obter controles de uma mesma procedência, ou seja, separar os agregados em lotes com o mesmo módulo de finura, este é o caso nas fábricas de pré-fabricados.

- Massa unitária

Segundo a norma NBR NM 45 (2006), a massa unitária (MU) é a relação entre a massa de um sólido lançado em um recipiente, sem compactar, e o volume desse recipiente, considerando-se também os vazios entre os grãos. É utilizada para transformar massa em volume e vice-versa. Pode ser feita com um único material ou com uma composição de materiais.

### **3.2.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS**

A granulometria é um método de classificação das partículas de uma amostra sólida pelos respectivos tamanhos. A granulometria é responsável por muitas propriedades dos materiais e a sua medida é de extrema importância. O método mais usual de análise granulométrica é o peneiramento, que consiste na passagem do material sólido por uma série de peneiras padronizadas, em ordem crescente de malha (DE AGUIAR et al., 2002).

A análise granulométrica consiste em separar o material em frações com partículas de tamanhos aproximadamente uniformes, pela passagem do material em uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, onde cada uma das peneiras retém uma parte da amostra.

Segundo BRITO et al. (2009), a partir da análise granulométrica, é possível expressar e comparar distribuições de tamanho de grão de maneira qualitativa e quantitativa.

Para a análise granulométrica do fosfogesso e do gesso mineral foi usado um peneirador mecânico com peneiras padronizadas pela ABNT: peneiras 0,840mm, 0,420mm, 0,210mm e 0,105mm, conforme procedimentos estabelecidos na norma NBR 12127 (1991).

### **3.2.4 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA**

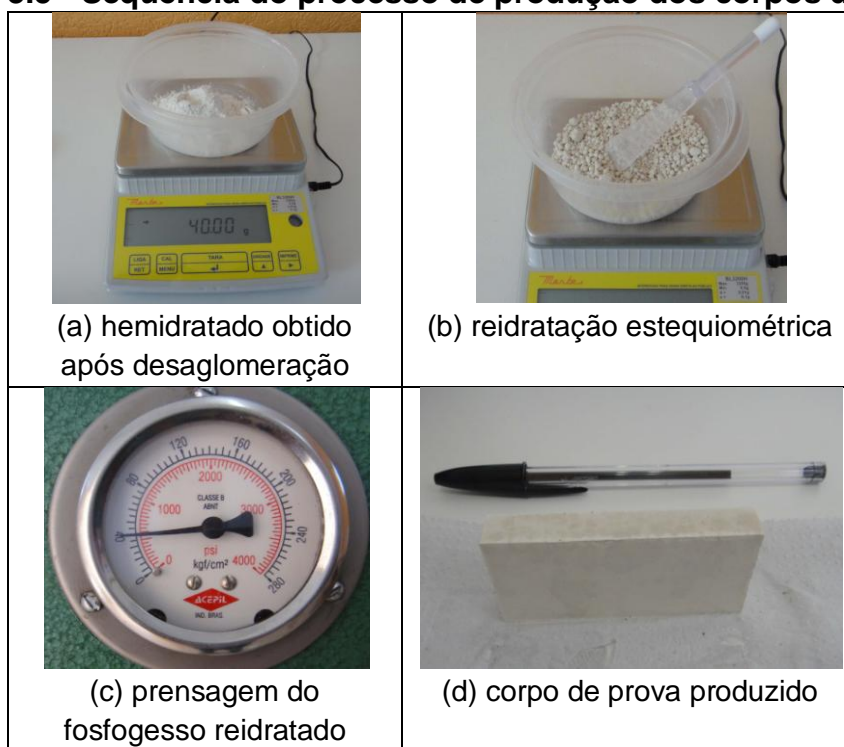
Para a moldagem dos corpos de prova, em prensa hidráulica, foi fixada a pressão de 40 kgf/cm<sup>2</sup>, para garantir que todos os corpos de prova fossem compactados de forma semelhante.

As massas de fosfogesso hemidratado e de água para reidratação foram iguais para todos os corpos de prova: 40g de fosfogesso hemidratado e 18,6% em peso de água, 7,44g, que corresponde estequiometricamente à quantidade de água necessária para a reidratação do sulfato de cálcio e ao traço 1:0,186, sendo esta a umidade ótima de compactação .

Apenas a temperatura e o tempo de calcinação foram diferentes, pois um dos objetivos foi analisar a interferência dessas variáveis na resistência mecânica.

Na Figura 3.5 é ilustrada a sequência do processo de produção dos corpos de prova.

**Figura 3.5 - Sequência do processo de produção dos corpos de prova**



(Fonte: Autor, 2013)

O fosfogesso reidratado foi moldado em matriz de 7 cm de comprimento, 3 cm de largura e 5 cm de profundidade. Estas dimensões foram adotadas em função do equipamento utilizado para os ensaios de resistência mecânica.

**Figura 3.6 - Levantamento das dimensões dos corpos de prova**

(Fonte: Autor, 2013)

Para determinar a densidade dos corpos de prova, bem como suas resistências mecânicas, foi necessário mensurar as dimensões e as massas de cada corpo de prova, conforme mostrado na Figura 3.6.

### 3.2.5 DENSIDADE A VERDE

Segundo BITTENCOURT (2009), a densidade a verde (DV) é a razão entre a massa e o volume do corpo de prova, ou pré-forma, logo após o processo de compactação. Em condições pré-estabelecidas, a densidade a verde define o grau de compactação que um determinado material pode apresentar.

DV é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada e depende da pressão, das características das matérias-primas, distribuição, tamanho e forma das partículas, uso ou não de lubrificantes e da geometria da matriz, fazendo relação com os espaços vazios na peça (BARBOZA, 2009).

A compressibilidade, ou variação infinitesimal do volume por unidade de variação de pressão, também pode ser representada como a eficiência da compactação em função da pressão, denominado de parâmetro de densificação.

A variação da densidade a verde dos corpos de prova demonstrará o controle sobre o processo de produção das peças em fosfogesso.

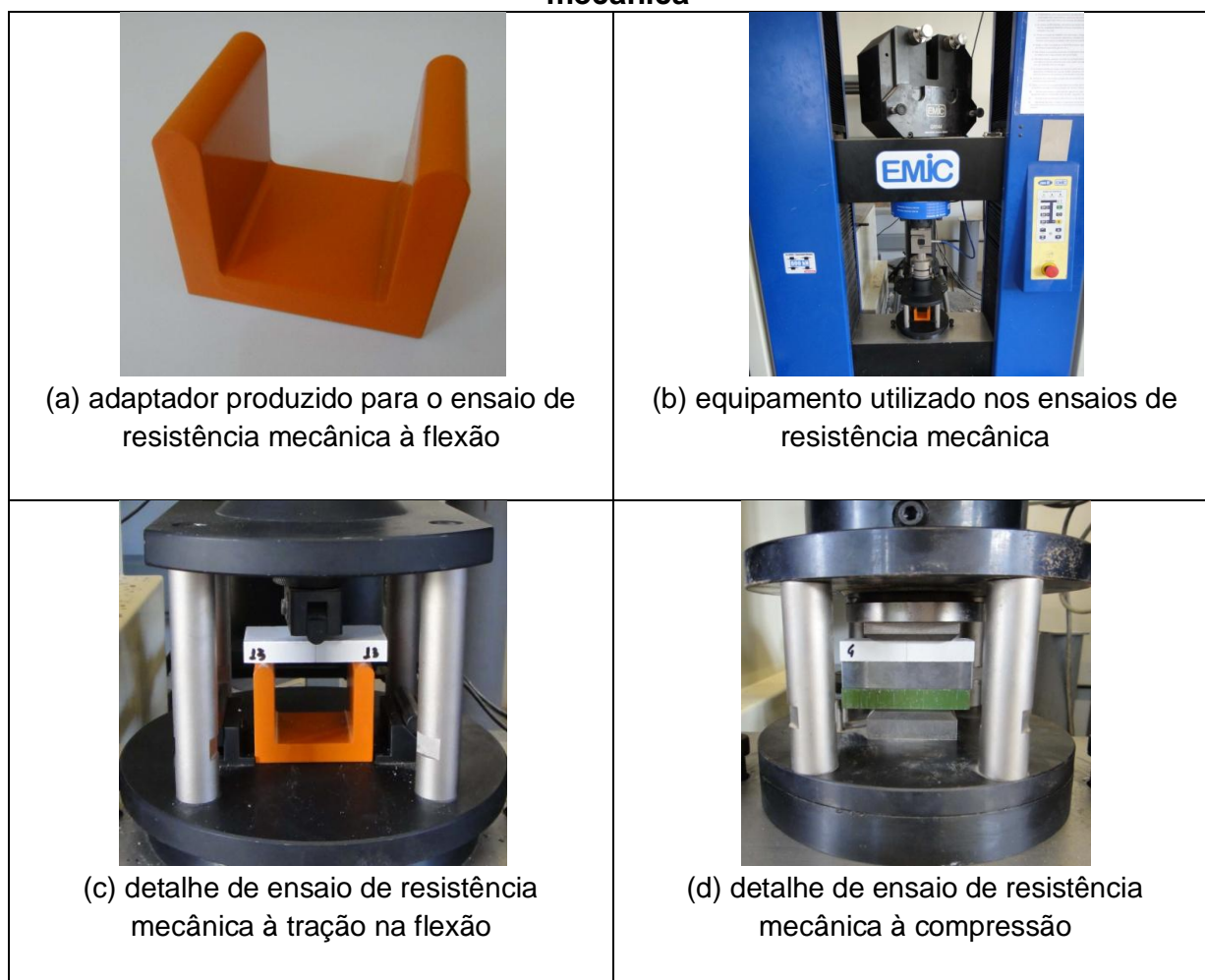
### 3.2.6 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para a determinação da resistência mecânica dos corpos de prova foi utilizado o equipamento do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Primeiro foram realizados os ensaios de resistência mecânica à tração na flexão, e após a ruptura, metade dos corpos de prova foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão e a outra metade utilizada para os ensaios de absorção de água.

A Figura 3.7 ilustra a sequência do procedimento para os ensaios de resistência mecânica.

**Figura 3.7 - Sequência do procedimento para os ensaios de resistência mecânica**



(Fonte: Autor, 2013).

Para determinar a resistência mecânica à tração na flexão foi necessário produzir um adaptador em aço, pois as dimensões dos corpos de prova produzidos eram menores que o mínimo requerido pelo equipamento do LSE (vide Figura 3.7 (a)).

### 3.2.7 ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Para a análise de absorção de água dos corpos de prova foram adotadas as recomendações normativas brasileiras para blocos de concreto e blocos cerâmicos.

A absorção de água foi determinada seguindo os procedimentos da norma NBR 12118 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio (Optou-se por saturar os corpos de prova ao invés do procedimento de fervura).

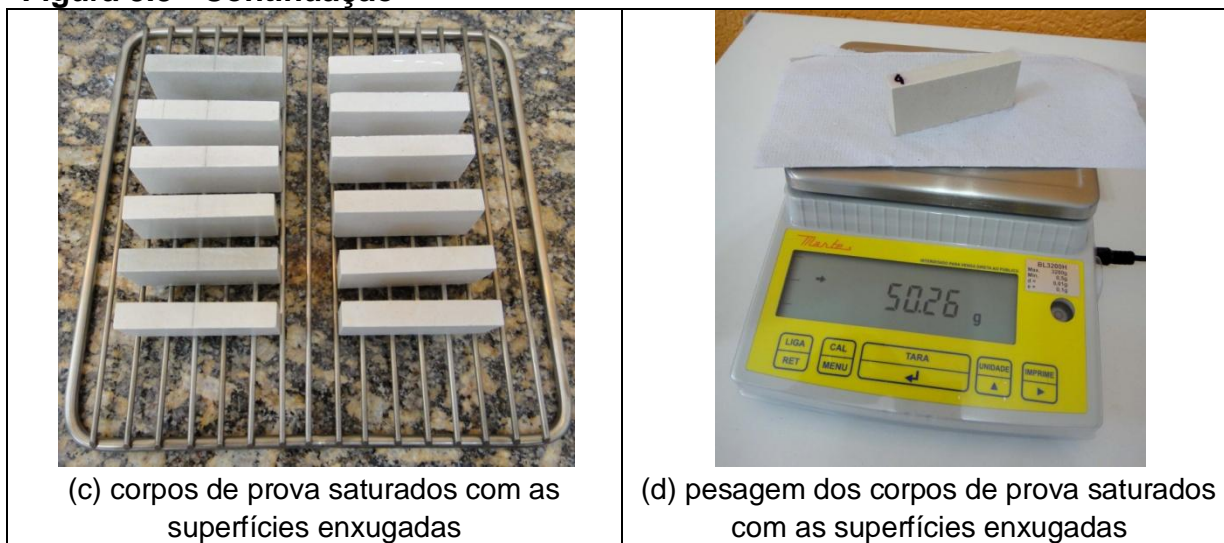
Os valores obtidos serão comparados com os limites estabelecidos na norma NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos, e também comparados com os limites estabelecidos na norma NBR 15270-2 – Componentes cerâmicos Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural – Terminologia e Requisitos.

A Figura 3.8 ilustra a sequência do procedimento adotado para obter os índices de absorção de água.

**Figura 3.8 - Sequência do procedimento para determinar a absorção de água**





**Figura 3.8 - Continuação**

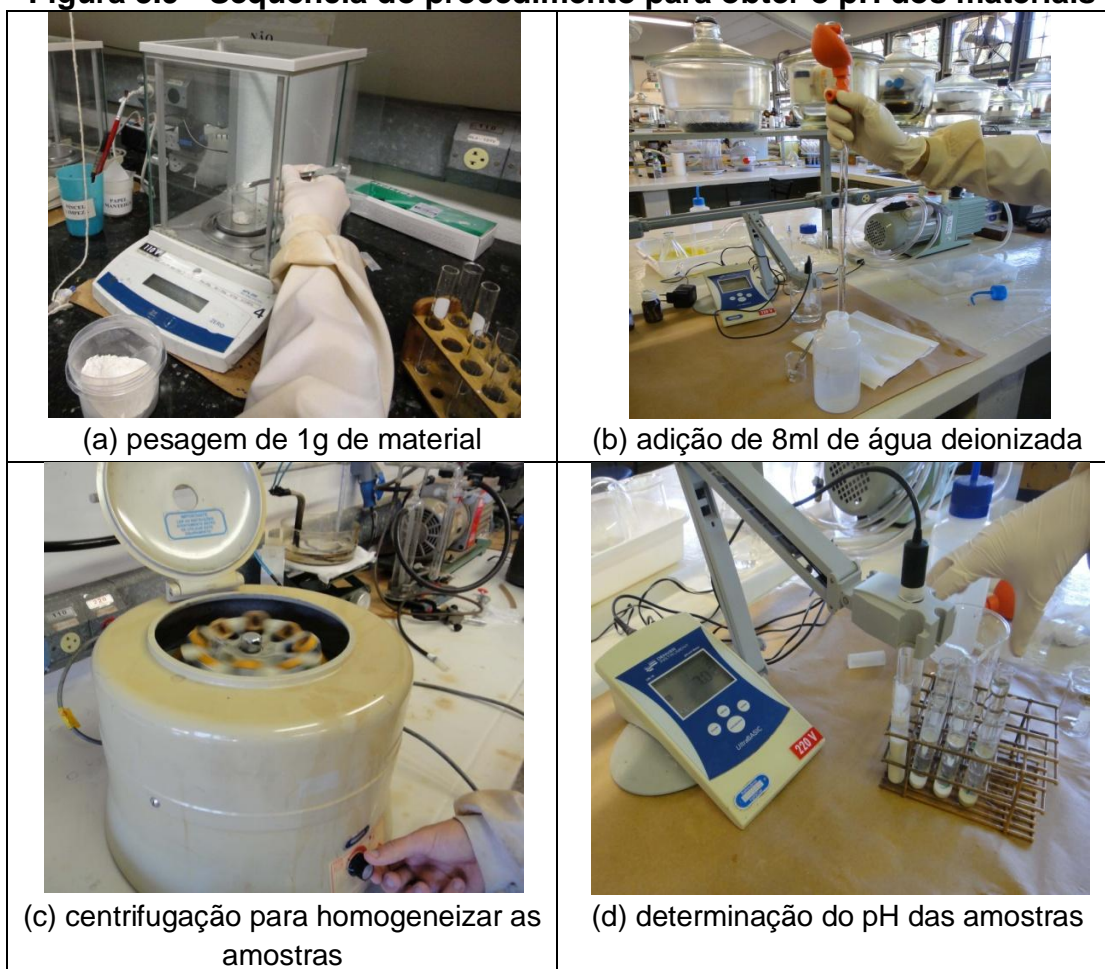
(Fonte: Autor, 2013)

### 3.2.8 ANÁLISE DE PH DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A determinação do pH dos materiais foi realizada no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC) do Departamento de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para a determinação do pH, foram analisadas as amostras de fosfogesso “in natura” (di-hidratado), de fosfogesso hemidratado (após calcinado), de gesso mineral para servir de referência e também da água deionizada para comparar com os valores da literatura.

Para cada amostra foi utilizado 1g de material e adicionado 8 ml de água deionizada, em seguida cada amostra foi homogeneizada, centrifugada e aferida em pHmetro de bancada, conforme a sequência do procedimento ilustrada na Figura 3.9.

**Figura 3.9 - Sequência do procedimento para obter o pH dos materiais**

(Fonte: Autor, 2013)

### 3.2.9 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A principal função de qualquer microscópio é tornar visível ao olho humano o que for muito pequeno para tal. A forma mais antiga e usual é a lupa seguida do microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. O limite máximo de resolução dos microscópios ópticos é estabelecido pelos efeitos de difração devido ao comprimento de onda da radiação incidente. Os microscópios ópticos convencionais ficam, então, limitados a um aumento máximo de 2000 vezes, porque acima deste valor, detalhes menores são imperceptíveis. Para aumentar a resolução pode-se utilizar uma radiação com comprimento de onda menor que a luz visível como fonte de iluminação do objeto. Além disso, a profundidade de campo é inversamente proporcional aos aumentos, sendo necessário, então, um polimento

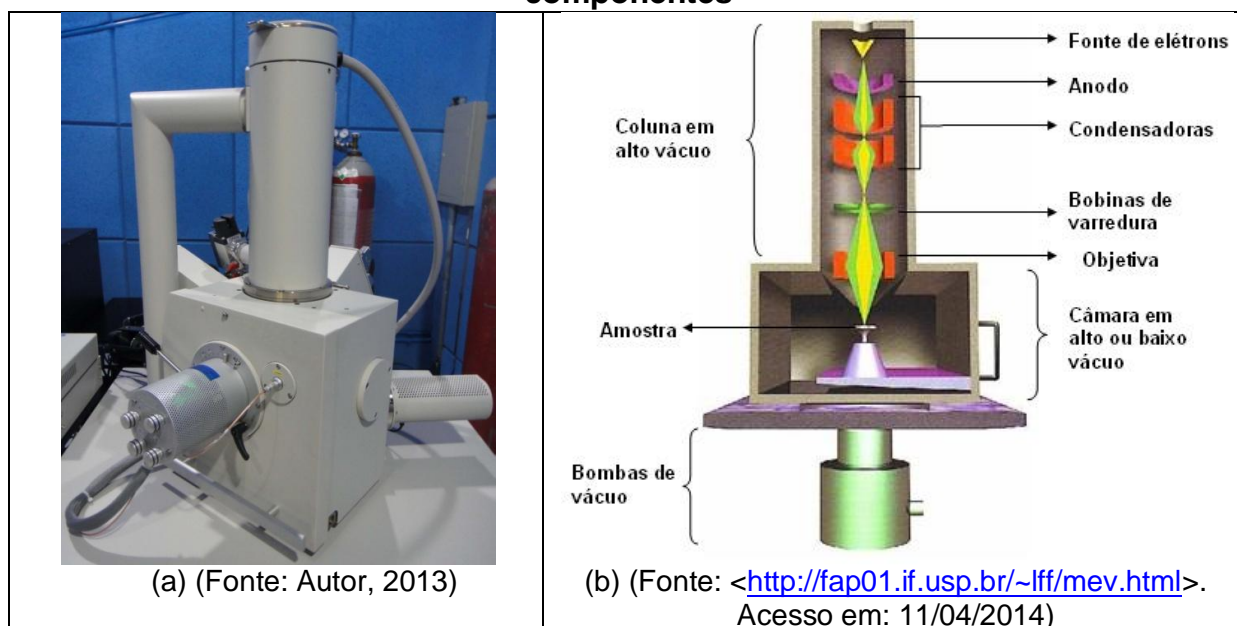


perfeito da superfície a ser observada, o que às vezes é incompatível com a observação desejada (KESTEMNBACH, 1994<sup>6</sup> *apud* DEDAVID et al., 2007).

Segundo DEDAVID et al. (2007), um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca.

Para conseguir gerar este feixe de elétrons que deve chegar à amostra, é necessária uma coluna em alto vácuo (Figura 3.10), onde fica todo o sistema de lentes eletromagnéticas, que são na verdade bobinas. No topo desta coluna está localizado o canhão de elétrons.

**Figura 3.10 - (a) MEV – (b) desenho esquemático com seus principais componentes**



Aparelhos modernos permitem aumentos de 300.000 vezes ou mais, para a maior parte de materiais sólidos, conservando a profundidade de campo compatível com a observação de superfícies rugosas.

<sup>6</sup> KESTEMNBACH H.; BOTA FILHO W. J. Microscopia Eletrônica de Transição e Varredura. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1994.

O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida. Sua utilização é comum em biologia, odontologia, farmácia, engenharia, química, metalurgia, física, medicina e geologia.

O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise de características microestruturais de objetos sólidos. A principal razão de sua utilidade é a alta resolução que pode ser obtida quando as amostras são observadas; valores da ordem de 2 a 5 nanômetros são geralmente apresentados por instrumentos comerciais, enquanto instrumentos de pesquisa avançada são capazes de alcançar uma resolução melhor que 1 nm (NAGATANI et al. 1987<sup>7</sup> *apud* DEDAVID et al., 2007).

Outra característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo. Permite, também, o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica (DEDAVID et al., 2007).

### **3.2.10 MICROANÁLISE DE RAIOS-X**

Segundo DEDAVID et al. (2007), a microanálise eletrônica consiste na medida de raios-X característicos emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X características são específicas do número atômico da amostra e o seu comprimento de onda, ou sua energia, podem ser utilizados para identificar o elemento químico que está emitindo a radiação.

Espectros de raios-X podem ser obtidos para todos os elementos da tabela periódica, com exceção do hidrogênio. Entretanto, a emissão dos primeiros dez elementos de baixo número atômico consiste de bandas na região de baixa energia onde as perdas por absorção na amostra são grandes. Assim, elementos como

---

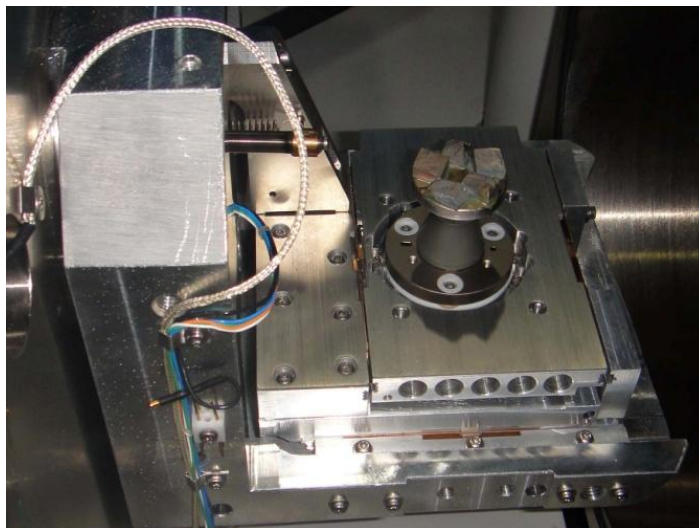
<sup>7</sup> NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. *Scanning Microscopy*. v.11, 901-909, 1987.

carbono, oxigênio e nitrogênio são frequentemente determinados por estequiometria (DEDAVID et al., 2007).

A análise por energia dispersiva de raios X (EDX ou EDS) é uma técnica amplamente usada para obter informações morfológicas da superfície de um material e identificação da composição química de uma amostra sob microscopia eletrônica de varredura (MEV). Este método detecta os raios-X produzidos como resultado de interações de feixe de elétrons com a amostra e a caracterização química é possível em grande parte ao princípio fundamental de que cada elemento químico possui uma estrutura atômica única, de modo que os raios-X emitidos são característicos desta estrutura, identificando assim o elemento e tornando possível obter o mapeamento da distribuição dos elementos químicos diferentes que constituem a amostra analisada (DEDAVID et al., 2007).

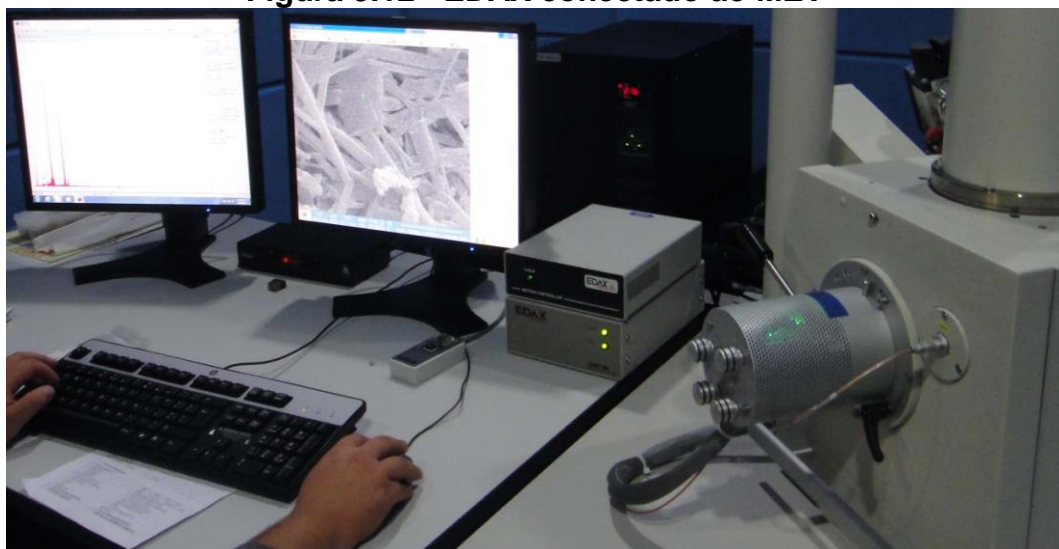
A Figura 3.11 ilustra as amostras de fosfogesso e de gesso mineral no interior da câmara de vácuo do MEV.

**Figura 3.11 - Amostras de fosfogesso e gesso mineral na câmara de vácuo do MEV**



(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

**Figura 3.12 - EDAX conectado ao MEV**



(Fonte: Autor, 2013)

A Figura 3.12 ilustra o equipamento de EDX ao centro acoplado ao MEV FEI-INSPECT S50, do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), utilizado para a realização da microscopia eletrônica de varredura e microanálise das amostras em fosfogesso e gesso mineral.

A partir da microanálise de raios-X foi possível efetuar a análise mineralógica das amostras de fosfogesso e gesso mineral.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados da pesquisa em conformidades com os experimentos realizados, compreendendo a análise da composição química, composição mineralógica, granulometria (módulo de finura e massa unitária), pH, resistência mecânica, absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microanálise de energia dispersiva de raios-X (EDX) e discussões sobre os ensaios realizados.

Foi fixada a pressão de 40 kgf/cm<sup>2</sup> para a produção dos corpos de prova em função de pressões maiores provocarem laminações nos corpos de prova.

### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO PÓ DE FOSFOGESSO

Para a determinação da granulometria das partículas de gesso mineral e de fosfogesso hemidratado foi utilizada a norma NBR 12127 (1991). Foi utilizado o método mecânico automático com peneiras padronizadas pela ABNT: peneiras 0,840mm, 0,420mm, 0,210mm e 0,105mm. Os resultados da granulometria do gesso mineral e do fosfogesso hemidratado estão descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2.

**Tabela 4.1 – granulometria do gesso mineral**

Pesagem	M = massa inicial (g)	m = Resíduo nas Peneiras (g)				
		0,840mm	0,420mm	0,210mm	0,105mm	fundo
1	100,02	0,04	0,29	0,33	11,35	88,01
2	100,04	0,02	0,22	0,39	12,52	86,89
<b>Média</b>	<b>100,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,26</b>	<b>0,36</b>	<b>11,94</b>	<b>87,45</b>
Diferença entre as medidas com a média:		< 0,10g	< 0,10g	< 0,10g	< 5%	< 5%

(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.2 – granulometria do fosfogesso hemidratado**

Pesagem	M = massa inicial (g)	m = Resíduo nas Peneiras (g)				
		0,840mm	0,420mm	0,210mm	0,105mm	fundo
1	100,01	0,00	2,44	2,88	11,32	83,37
2	100,02	0,00	2,47	2,76	10,28	84,51
<b>Média</b>	<b>100,02</b>	<b>0,00</b>	<b>2,46</b>	<b>2,82</b>	<b>10,80</b>	<b>83,94</b>
Diferença entre as medidas com a média:		< 0,10g	< 5%	< 5%	< 5%	< 5%

(Fonte: Autor, 2013)

Os resultados das duas pesagens para o gesso mineral e também para o fosfogesso hemidratado atendem a norma NBR 12127 (1991), que estabelece que as duas determinações não devem diferir de mais de 5% em relação à média aritmética, ou quando os resíduos forem menores de 2g, a diferença não deve ser maior que 0,10g.

#### 4.1.1 MÓDULO DE FINURA

Os resultados da análise do módulo de finura para o gesso mineral e para o fosfogesso hemidratado estão descritos nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

**Tabela 4.3 - módulo de finura do gesso mineral**

Peneira	Equação	M1	D	Material retido (%)
0,840 mm	$R = m/M \cdot 100$			0,03
0,420 mm	$R = m/M \cdot 100$			0,25
0,210 mm	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	99,75	0,99745	0,36
0,105 mm	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	99,75	0,99745	11,94
fundo	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	99,75	0,99745	87,45
<b>Módulo de finura:</b>				<b>0,13</b>

(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.4 - módulo de finura do fosfogesso**

Peneira	Equação	M1	D	Material retido (%)
0,840 mm	$R = m/M \cdot 100$			0,00
0,420 mm	$R = m/M \cdot 100$			2,45
0,210 mm	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	97,56	0,9756	2,82
0,105 mm	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	97,56	0,9756	10,80
fundo	$R = m/M_1 \cdot D \cdot 100$	97,56	0,9756	83,94
<b>Módulo de finura:</b>				<b>0,16</b>

(Fonte: Autor, 2013)

Segundo a norma NBR 13207 (1994), o módulo de finura do gesso para revestimento e para fundição destinados á construção civil deve ser inferior a 1,10.

Analisando as Tabelas 4.3 e 4.4, observa-se que o módulo de finura das amostras de gesso mineral e de fosfogesso hemidratado atendem a norma NBR 13207 (1994).

#### 4.1.2 MASSA UNITÁRIA

Para determinar a massa unitária do gesso mineral e do fosfogesso hemidratado foram feitas duas medições para cada material, conforme determina a norma NBR 12127 (1991).

Os resultados da análise da massa unitária para o gesso mineral e para o fosfogesso hemidratado estão descritos nas Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente.

**Tabela 4.5 – massa unitária do gesso mineral**

Pesagem	M (g)	V (cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )
1	107,6	147	730
2	103,2	147	700
<b>Média</b>	<b>105,4</b>	<b>147,4</b>	<b>715</b>

Diferença entre as medidas com a média: < 5%  
(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.6 – massa unitária do fosfogesso hemidratado**

Pesagem	M (g)	V (cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )
1	80,7	147	548
2	83,1	147	564
<b>Média</b>	<b>81,9</b>	<b>147,4</b>	<b>556</b>

Diferença entre as medidas com a média: < 5%  
(Fonte: Autor, 2013)

Segundo a norma NBR 13207 (1994), a massa unitária do gesso para a construção civil deve ser superior a 700 kg/m<sup>3</sup>.

Analisando a Tabela 4.5 é possível observar que a massa unitária média da amostra de gesso mineral atingiu 715 kg/m<sup>3</sup>, valor superior a 700 kg/m<sup>3</sup> conforme as recomendações da NBR 13207 (1994). Deste modo, o resultado obtido para a média

das amostras de fosfogesso hemidratado, vide Tabela 4.6, está 20,6% abaixo da massa unitária exigida por esta norma.

#### 4.2 DETERMINAÇÃO DO PH DAS AMOSTRAS DE FOSFOGESSO

Os resultados da análise do pH das amostras estão descritos na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 – pH das amostras analisadas**

Amostra	pH		
	Medida 1	Medida 2	Média
<b>Gesso mineral</b>	7,0	6,9	7,0
<b>Fosfogesso "in natura"</b>	2,5	2,7	2,6
<b>Fosfogesso hemidratado</b>	2,7	2,9	2,8
<b>Água deionizada</b>	6,4	5,7	6,1

(Fonte: Autor, 2013)

Pode-se observar que o pH médio do gesso mineral é 7, neutro, enquanto que nas amostras do fosfogesso "in natura" ou no fosfogesso hemidratado, o pH é ácido, resultado do contato com o ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) e com o ácido fluorídrico (HF), no processo definido através da Equação (2), descrita anteriormente.

O pH médio da água deionizada usada na pesquisa foi 6,1.

Na literatura é descrito que o pH da água deionizada deve estar no intervalo entre 5,5 e 6,5, portanto o resultado obtido está dentro deste intervalo e garante a qualidade da análise de pH.

A preocupação em determinar o pH das amostras é em função da acidez do fosfogesso, pois, em meio ácido, existe uma maior facilidade para a proliferação de fungos e, segundo ÂNGULO et al. (2001) e CANUT (2006), testes realizados com fosfogesso mostraram o surgimento de fungos.



### 4.3 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO COM MELHOR COMBINAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E TEMPO DE CALCINAÇÃO PARA O FOSFOGESSO.

Objetivando encontrar a relação ideal entre a temperatura e o tempo de calcinação do fosfogesso, foram preparados inicialmente 12 corpos de prova em fosfogesso desidratados com diferentes temperaturas, que variaram entre 120 e 180°C, e tempos que variaram entre 60 e 150 minutos, depois foram submetidos aos ensaios de resistência mecânica, conforme descrito na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 – Análise preliminar de resistência mecânica à tração na flexão e à compressão**

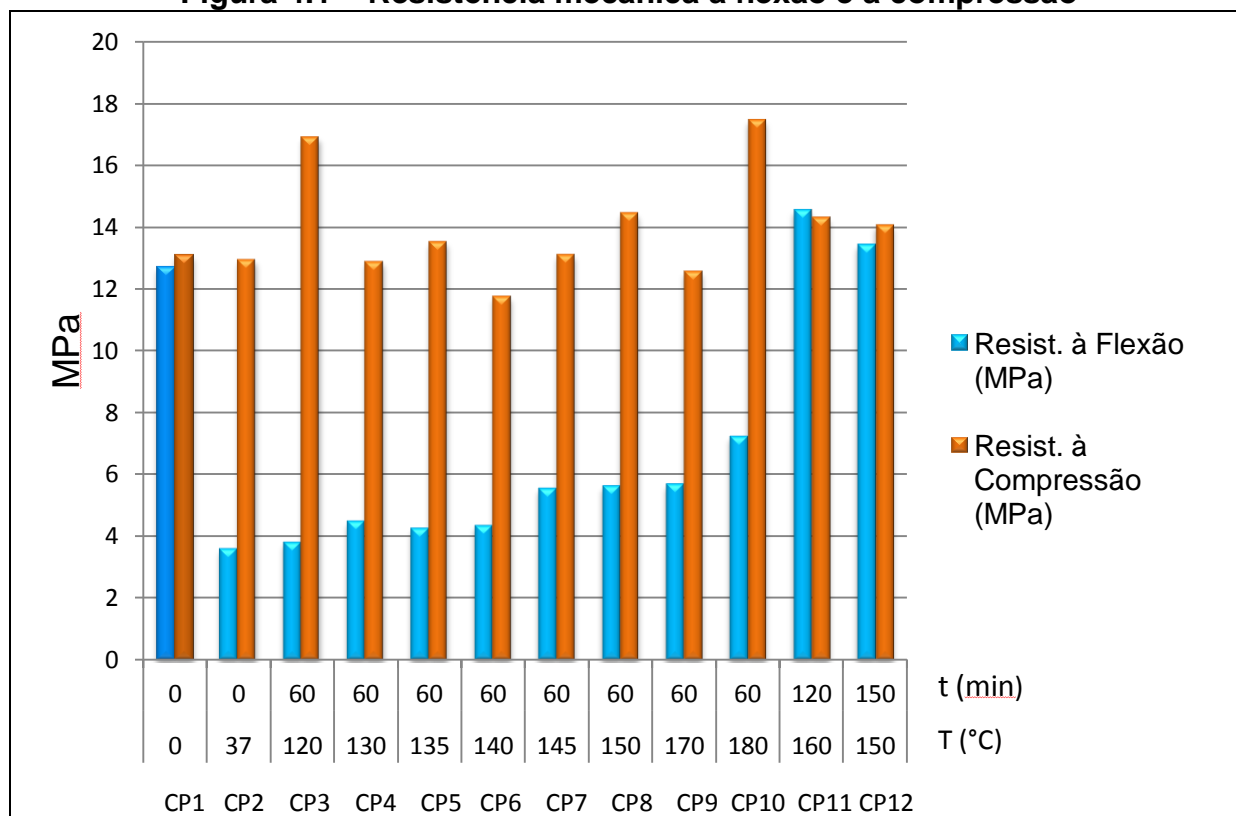
CP	T (°C)	t (min)	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)
1	0	0	12,71	13,1
2	37	0	3,61	12,95
3	120	60	3,82	16,91
4	130	60	4,5	12,89
5	135	60	4,27	13,53
6	140	60	4,37	11,76
7	145	60	5,57	13,11
8	150	60	5,64	14,46
9	170	60	5,7	12,57
10	180	60	7,25	17,46
11	160	120	14,56	14,31
12	150	150	13,44	14,07

(Fonte: Autor, 2013)

O CP 1 foi produzido em gesso mineral para servir como referência para o método proposto, e o CP 2, produzido com fosfogesso “in natura”, sem ter sido desidratado, também para servir como referência.

Observando a Tabela 4.8 é possível observar que o CP 11, produzido com fosfogesso desidratado a 160°C durante 120 minutos, obteve resistência mecânica à flexão, e também à compressão, superior a 14 MPa, enquanto que os demais CP confeccionados em fosfogesso, com exceção ao CP 12, obtiveram resistência mecânica à flexão inferior a 8 MPa.

**Figura 4.1 – Resistência mecânica à flexão e à compressão**



(Fonte: Autor, 2013)

Na resistência à flexão os valores ficaram no intervalo de 3 a 8 MPa para temperaturas de 120 a 180°C, com um tempo de 60 minutos. Todavia para as temperaturas de 160 e 150°C com tempo entre 120 e 150 minutos os valores da resistência à flexão subiram para o intervalo entre 13 e 15 MPa, o que corresponde a um aumento de cerca de 100%.

Observando a Tabela 4.8 e a Figura 4.1, verifica-se que a melhor combinação entre temperatura e tempo para a desidratação do fosfogesso encontra-se no intervalo entre 150 e 160°C e próximo de 120 minutos.

#### 4.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A VERDE

Após constatar que a melhor combinação entre a temperatura e o tempo de desidratação do fosfogesso encontrava-se próximo a 160°C por 120 minutos, optou-se por fixar o tempo em 120 minutos e preparar 6 corpos de prova para cada uma das seguintes temperaturas: 157, 159 e 161°C.

Os resultados das densidades a verde para os corpos de prova produzidos com fosfogesso desidratado a 157, 159 e 161°C estão descritos respectivamente nas Tabelas 4.9, 4.10 e 4.11.

**Tabela 4.9 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 157°C/120min**

Fosfogesso - 157°C/120min	Densidade a verde (g/cm <sup>3</sup> )
CP1	1,916
CP2	1,921
CP3	1,916
CP4	1,913
CP5	1,919
CP6	1,923

(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.10 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 159°C/120min**

Fosfogesso - 159°C/120min	Densidade a verde (g/cm <sup>3</sup> )
CP1	1,975
CP2	1,977
CP3	1,981
CP4	1,980
CP5	1,984
CP6	1,976

(Fonte: Autor, 2013)

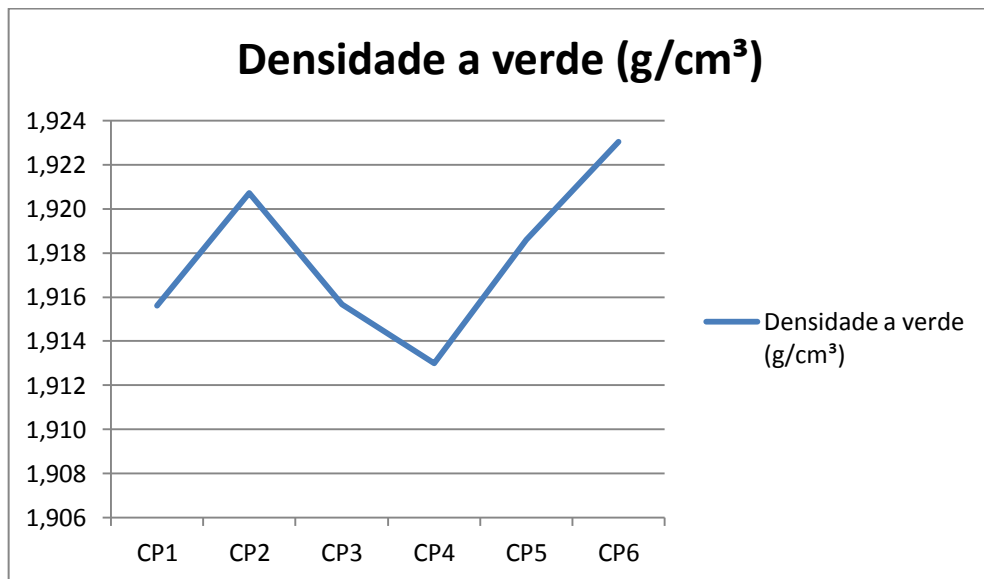
**Tabela 4.11 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 161°C/120min**

Fosfogesso - 161°C/120min	Densidade a verde (g/cm <sup>3</sup> )
CP1	1,995
CP2	1,994
CP3	1,987
CP4	1,985
CP5	1,993
CP6	1,993

(Fonte: Autor, 2013)

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram respectivamente os gráficos gerados pelas densidades a verde para os corpos de prova confeccionados em fosfogesso desidratado a 157, 159 e 161°C.

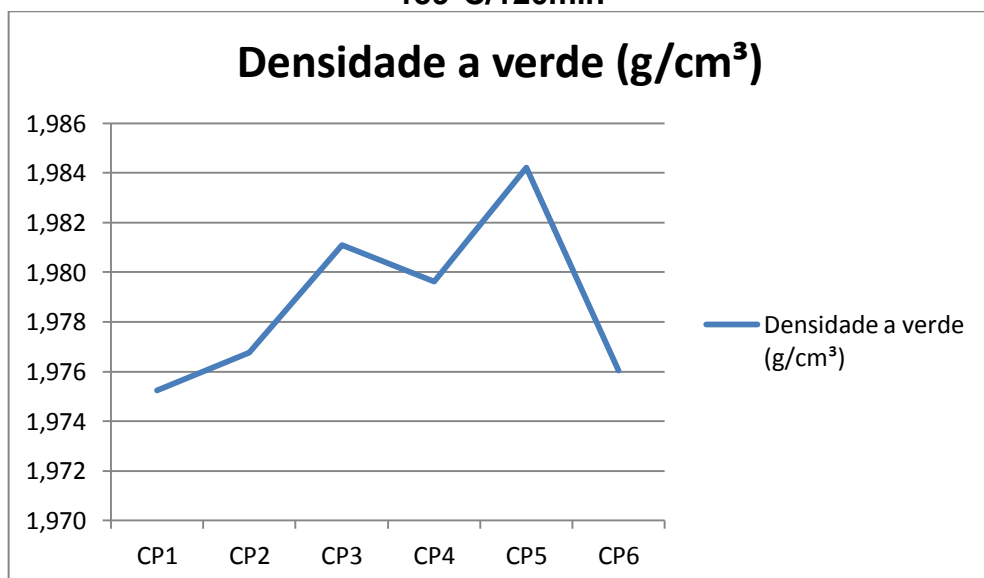
**Figura 4.2 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 157°C/120min**



(Fonte: Autor, 2013)

Para a temperatura de 157°C a variação da DV entre os corpos de prova foi inferior a 0,3%, sendo praticamente todas iguais a 1,92g/cm<sup>3</sup>, demonstrando controle e excelente qualidade no processo de produção dos corpos de prova.

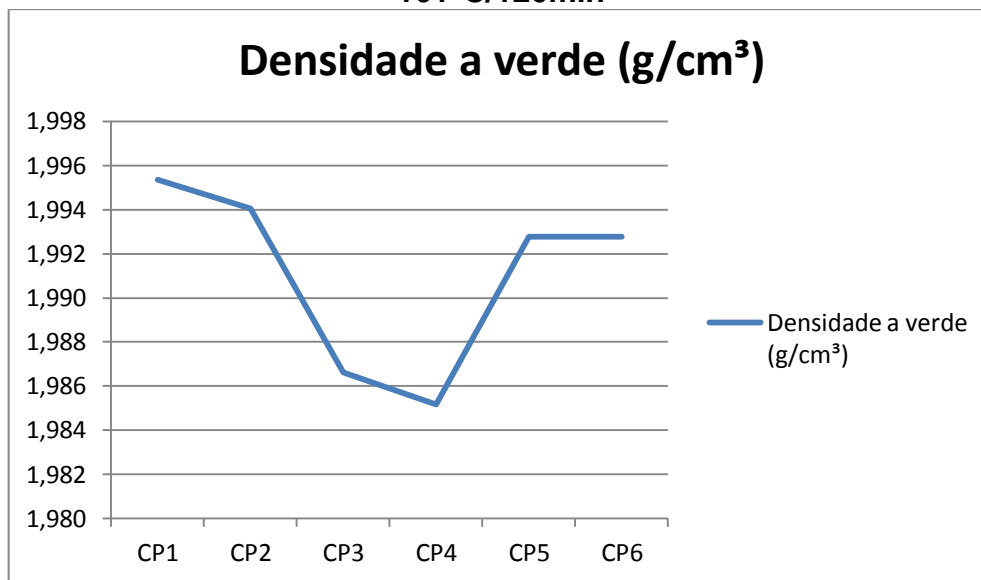
**Figura 4.3 – DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 159°C/120min**



(Fonte: Autor, 2013)

Para a temperatura de 159°C a variação da DV entre os corpos de prova foi inferior a 0,3%, sendo praticamente todas iguais a 1,98g/cm<sup>3</sup>, demonstrando controle e excelente qualidade no processo de produção dos corpos de prova.

**Figura 4.4 - DV dos corpos de prova em fosfogesso hemidratado a 161°C/120min**



(Fonte: Autor, 2013)

Para a temperatura de 161°C a variação da DV entre os corpos de prova foi inferior a 0,4%, sendo praticamente todas iguais a 1,99g/cm<sup>3</sup>, demonstrando controle e excelente qualidade no processo de produção dos corpos de prova.

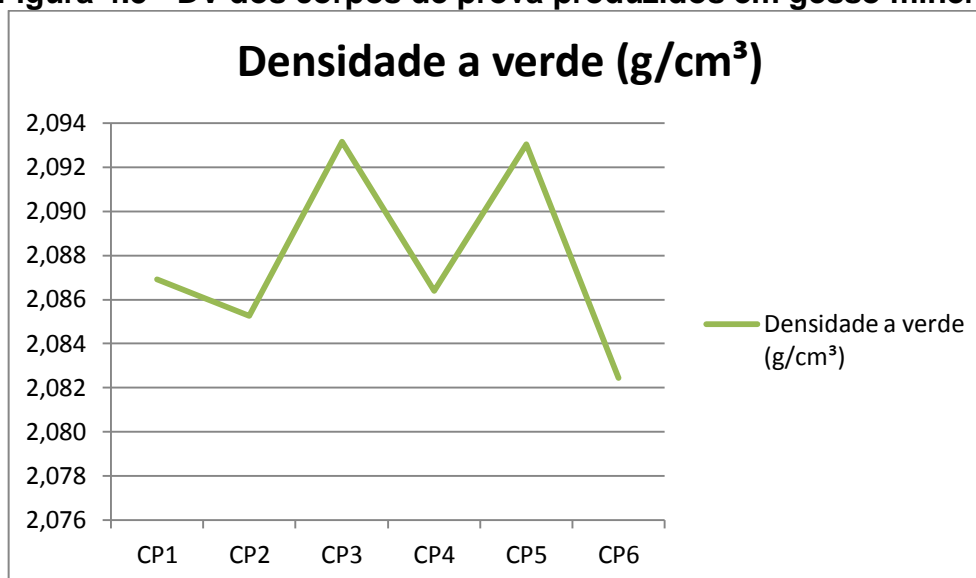
Para o gesso mineral também foram confeccionados 6 corpos de prova para servirem como parâmetro para a pesquisa. Os resultados da densidade a verde dos corpos de prova confeccionados em gesso mineral estão descritos e ilustrados na Tabela 4.12 e Figura 4.5.

**Tabela 4.12 - DV dos corpos de prova produzidos em gesso mineral**

Gesso mineral	Densidade a verde (g/cm <sup>3</sup> )
CP1	2,087
CP2	2,085
CP3	2,093
CP4	2,086
CP5	2,093
CP6	2,082

(Fonte: Autor, 2013)

**Figura 4.5 - DV dos corpos de prova produzidos em gesso mineral**



(Fonte: Autor, 2013)

Analisando a Tabela 4.12 é possível verificar que a DV dos corpos de prova confeccionados em gesso mineral, com média de 2,09g/cm<sup>3</sup>, é superior às DV dos corpos de prova confeccionados em fosfogesso hemidratado, confirmando os resultados obtidos na análise da massa unitária para os dois materiais, onde foi constatado que a massa unitária do fosfogesso hemidratado é inferior ao do gesso mineral.

A variação da DV entre os corpos de prova produzidos em gesso mineral também foi inferior a 0,3%, demonstrando controle e excelente qualidade no processo de produção dos corpos de prova.

#### **4.5 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA OS CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS EM FOSFOGESSO DESIDRATADO EM 120 MINUTOS**

Os resultados da resistência mecânica para os corpos de prova produzidos com fosfogesso desidratado a 157, 159 e 161°C estão descritos respectivamente nas Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15.

**Tabela 4.13 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 157°C/120min**

Fosfogesso - 157°C/120min	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)
CP1	4,59	12,63
CP2	5,62	13,89
CP3	11,89	12,72
CP4	12,48	12,58
CP5	10,29	13,16
CP6	9,82	11,37

(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.14 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 159°C/120min**

Fosfogesso - 159°C/120min	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)
CP1	13,93	14,12
CP2	12,69	13,89
CP3	15,43	14,89
CP4	12,98	14,68
CP5	14,92	16,03
CP6	16,01	14,74

(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.15 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 161°C/120min**

Fosfogesso - 161°C/120min	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)
CP1	9,74	13,62
CP2	14,01	11,98
CP3	12,73	10,90
CP4	15,05	13,89
CP5	12,75	10,87
CP6	11,16	9,86

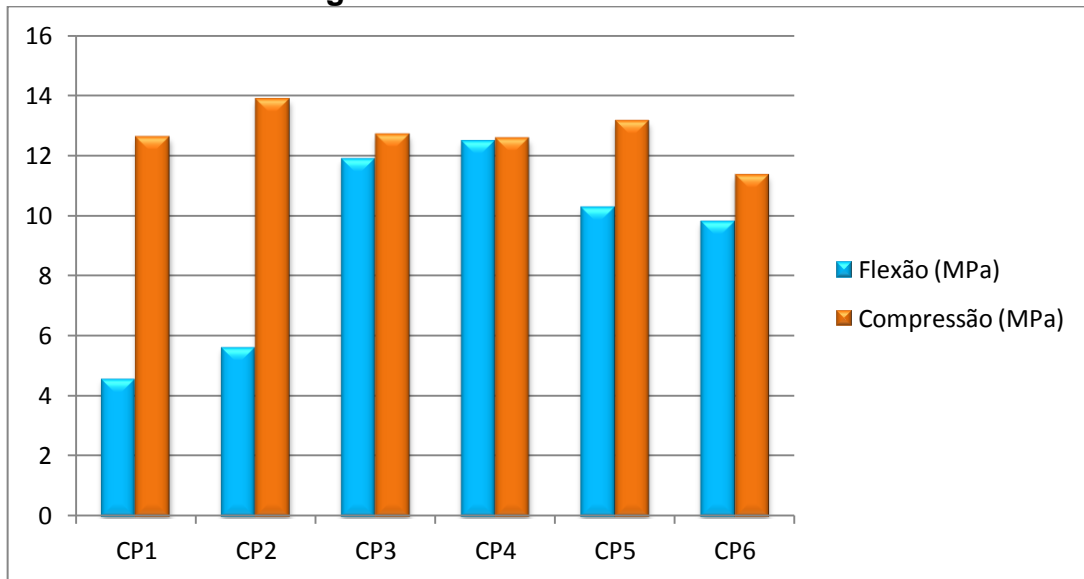
(Fonte: Autor, 2013)

Analisando as Tabelas 4.13, 4.14 e 4.15, verifica-se que a temperatura que obteve melhores resultados quanto à resistência mecânica foi a de 159°C.

Salienta-se que a magnitude dos valores de resistência mecânica obtidos está de acordo com o esperado para esse estudo. Todavia, as variações elevadas encontradas, principalmente na resistência mecânica à tração na flexão (CP1 e CP2 – Tabela 4.13), podem ter ocorrido em função de problemas observados no equipamento utilizado para os ensaios.

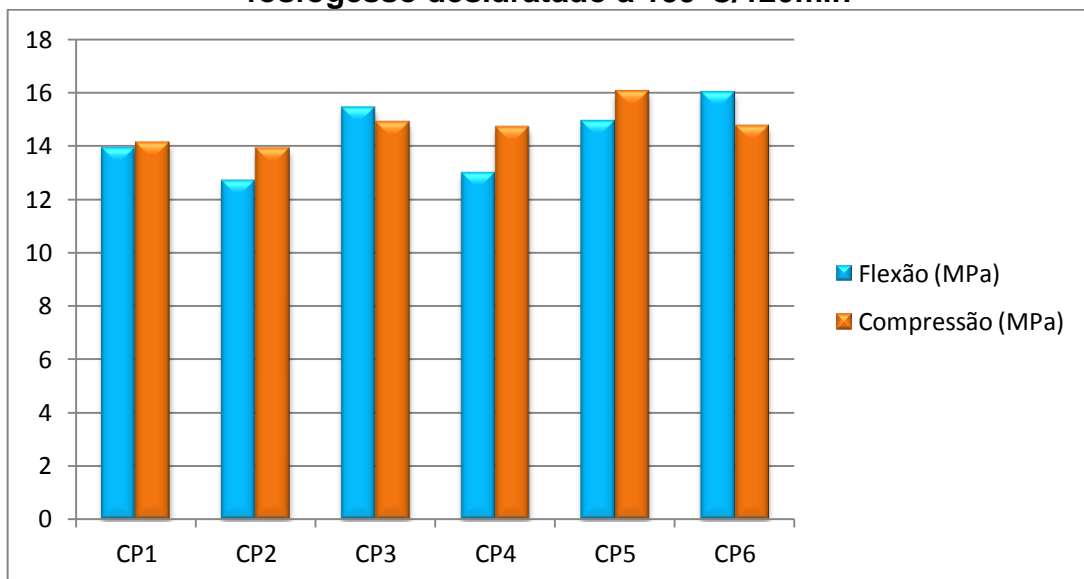
As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 ilustram respectivamente as resistências mecânicas para os corpos de prova confeccionados em fosfogesso desidratado a 157, 159 e 161°C. Enquanto que a Tabela 4.16 e a Figura 4.9 referem-se aos corpos de prova confeccionados em gesso mineral.

**Figura 4.6 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 157°C/120min**



(Fonte: Autor, 2013)

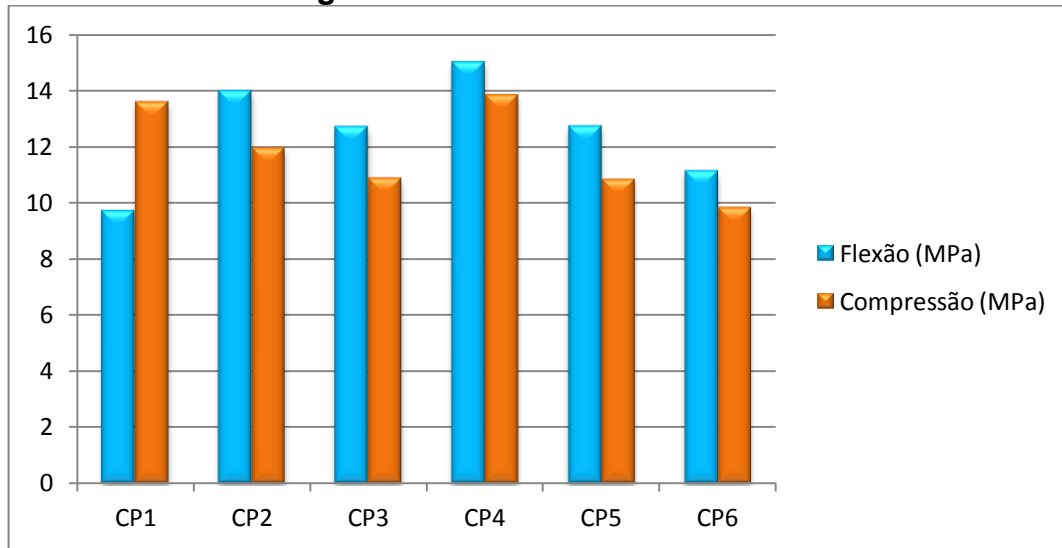
**Figura 4.7 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 159°C/120min**



(Fonte: Autor, 2013)



**Figura 4.8 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do fosfogesso desidratado a 161°C/120min**



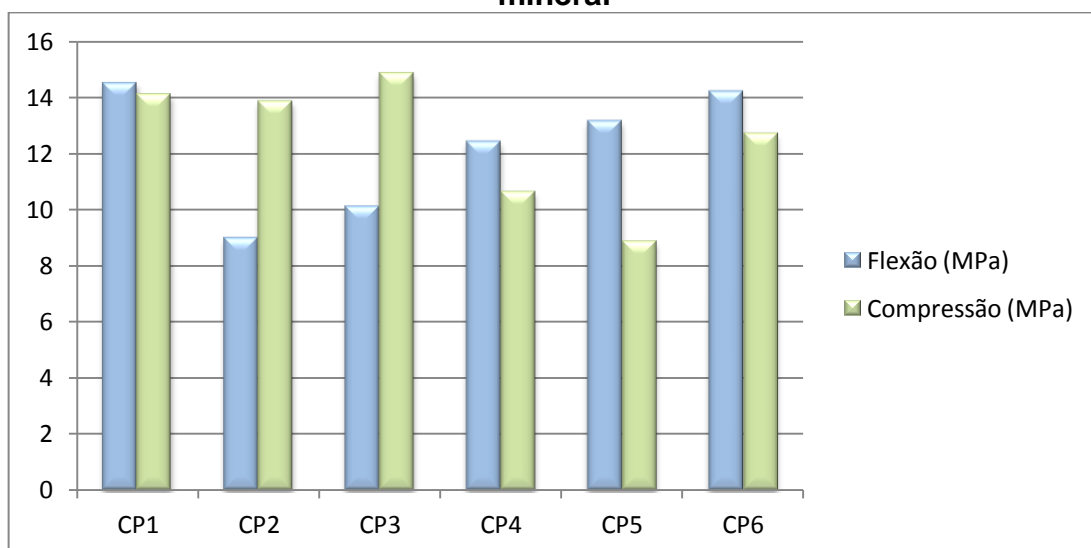
(Fonte: Autor, 2013)

**Tabela 4.16 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do gesso mineral**

Gesso mineral	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)
CP1	14,53	14,12
CP2	9,01	13,89
CP3	10,14	14,89
CP4	12,45	10,65
CP5	13,18	8,89
CP6	14,23	12,74

(Fonte: Autor, 2013)

**Figura 4.9 - Resistência mecânica à tração na flexão e à compressão do gesso mineral**



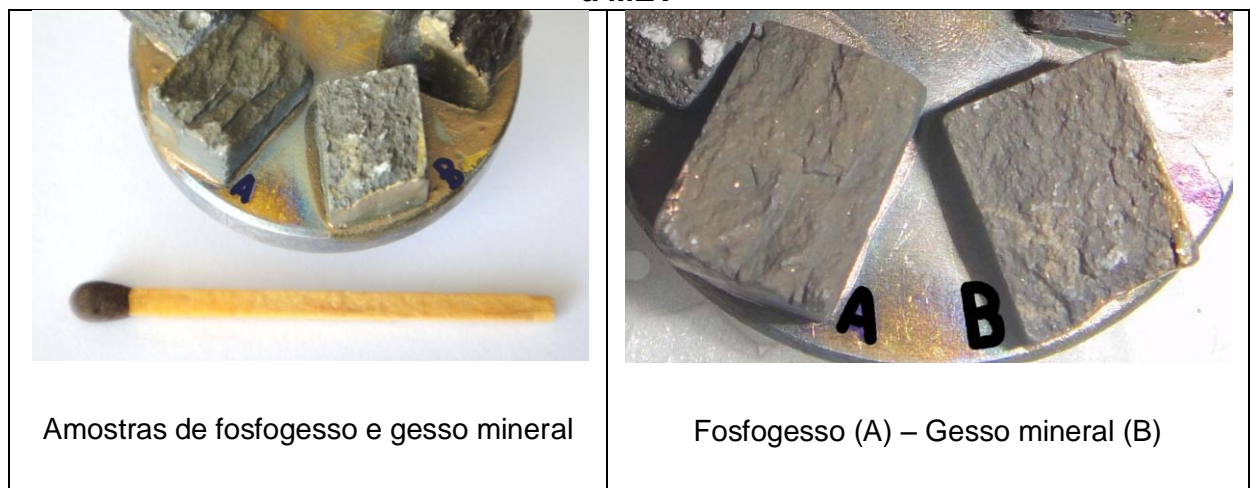
(Fonte: Autor, 2013)

Para que tenhamos uma noção da resistência mecânica alcançada para o fosfogesso hemidratado, segundo CERVO (2004), os concretos convencionais são dosados habitualmente para uma resistência mecânica à tração na flexão entre 4 e 5 MPa, enquanto que os concretos de alto desempenho são dosados para resistências à tração na flexão superiores a 5,5 MPa.

#### 4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DAS AMOSTRAS

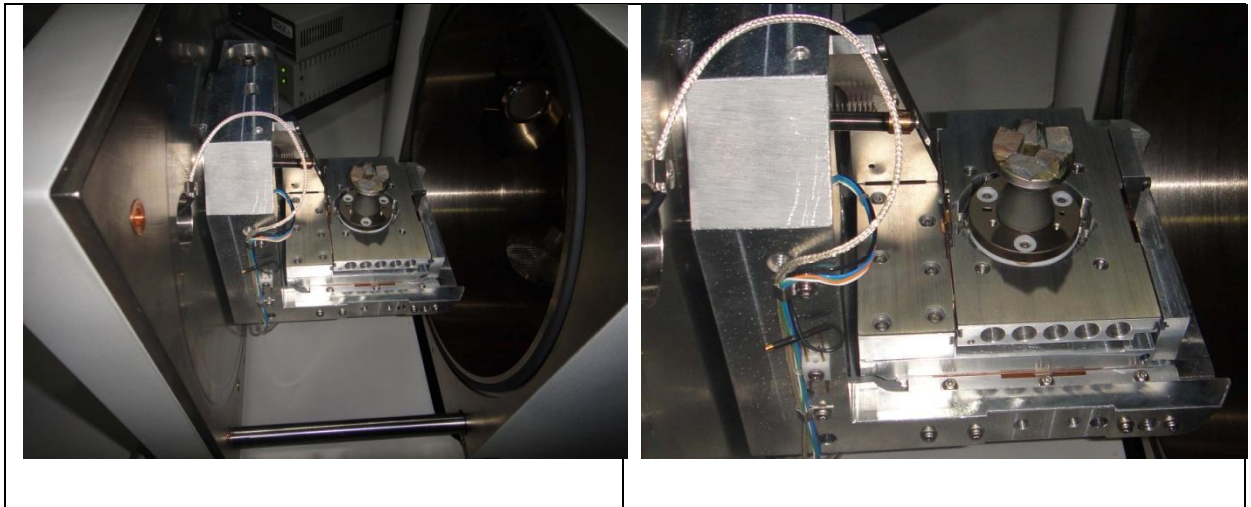
A Figura 4.10 ilustra os fragmentos de corpos de prova produzidos em fosfogesso hemidratado e em gesso mineral, preparados para serem observados pelo microscópio eletrônico de varredura.

**Figura 4.10 - Amostras de fosfogesso hemidratado e gesso mineral submetidas à MEV**



(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

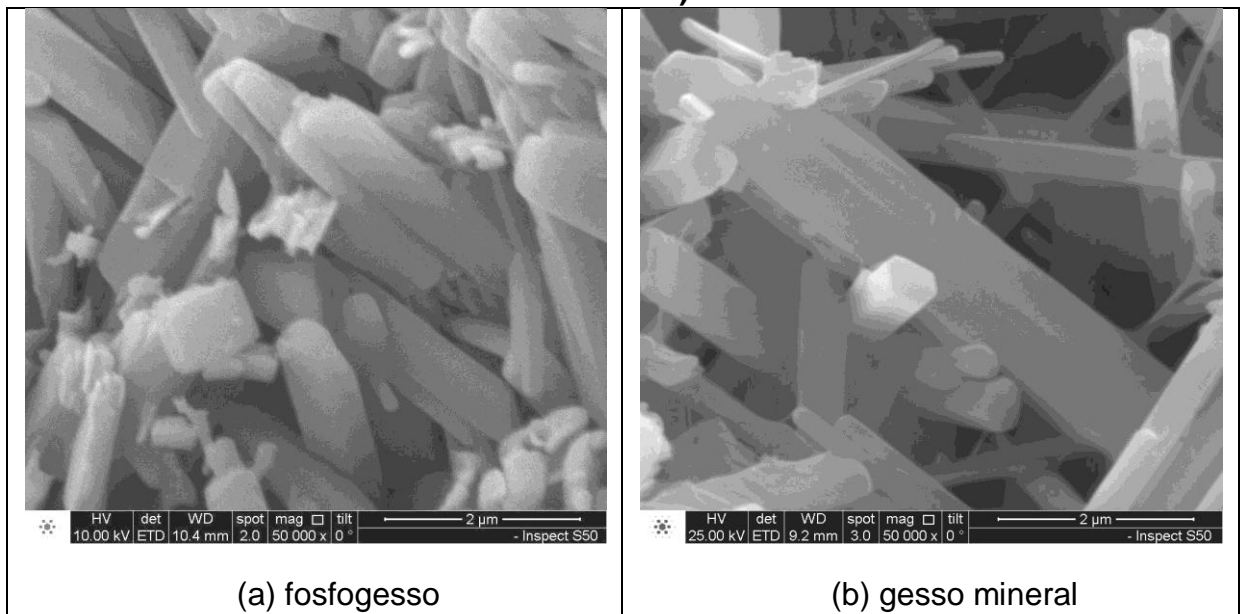
**Figura 4.11 - Amostras de fosfogesso hemidratado e gesso mineral no interior do MEV**



(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

A Figura 4.11 ilustra os fragmentos de fosfogesso hemidratado e de gesso mineral no interior do MEV para serem observadas.

**Figura 4.12 - MEV de fosfogesso hemidratado e gesso mineral (ampliado 50.000x)**



(a) fosfogesso

(b) gesso mineral

(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

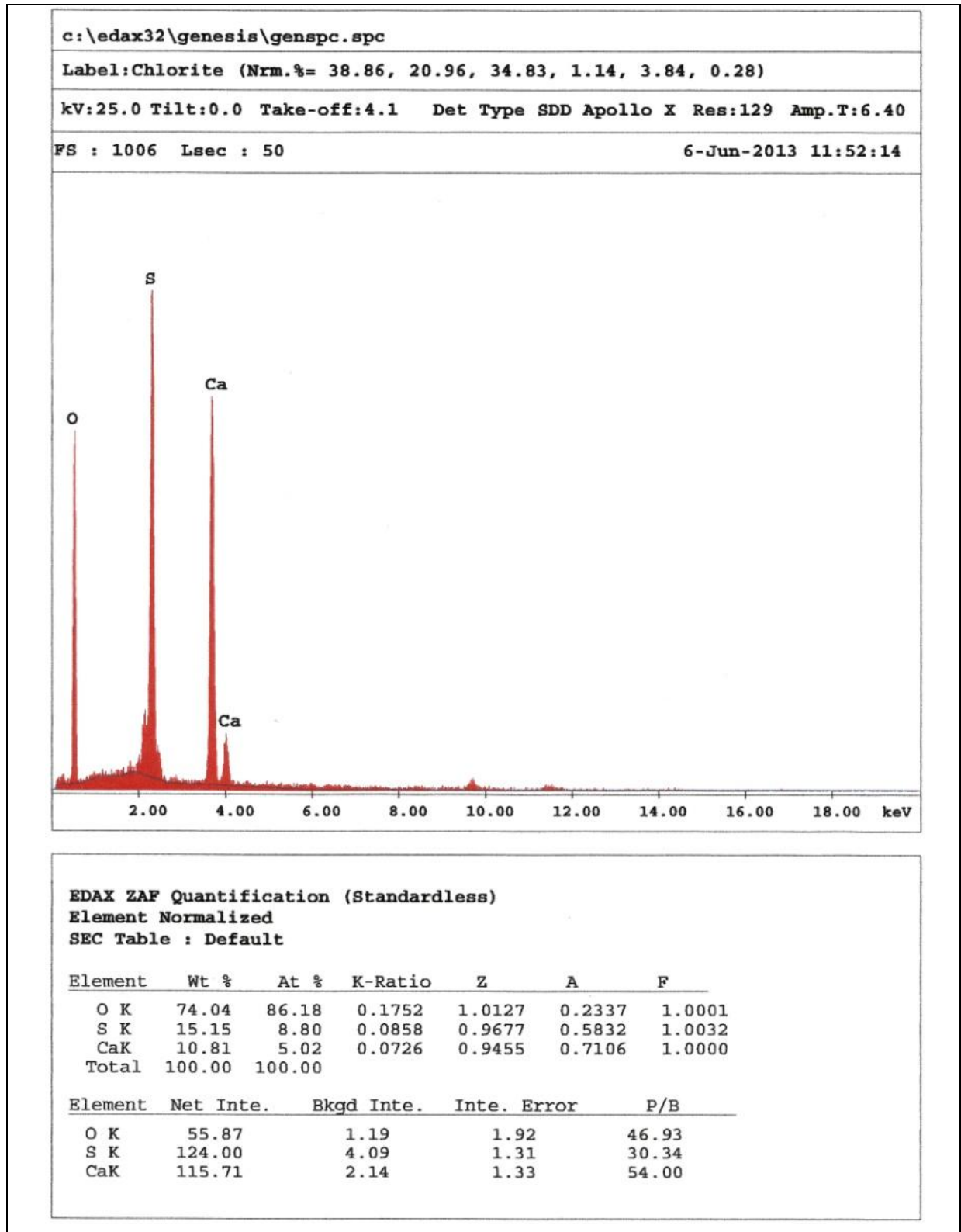
Através da Figura 4.12, com ampliação de 50.000 vezes, é possível verificar a grande semelhança entre as estruturas cristalinas das amostras de fosfogesso hemidratado e de gesso mineral.

A principal diferença observada nas imagens de MEV está nos espaços entre os cristais. No MEV do fosfogesso (a) os cristais estão mais próximos, sendo que no MEV do gesso mineral (b), é possível observar vários espaços sem a presença de cristais.

#### **4.7 ANÁLISE POR ENERGIA DISPERSIVA DE RAIOS X (EDX)**

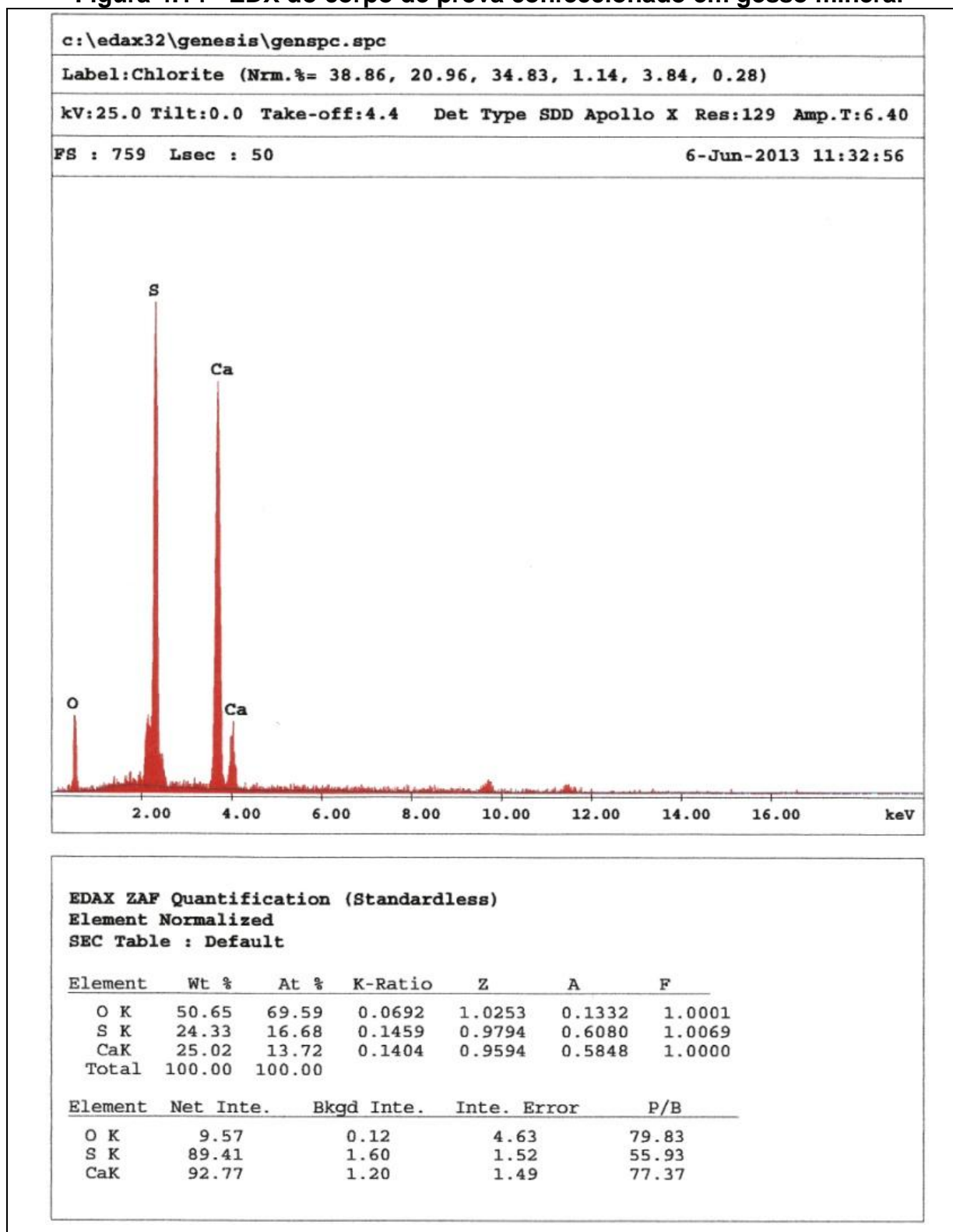
As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram os respectivos espectros do fosfogesso hemidratado e do gesso mineral gerados na microanálise por EDX.

**Figura 4.13 - EDX do corpo de prova confeccionado em fosfogesso hemidratado**



(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

Figura 4.14 - EDX do corpo de prova confeccionado em gesso mineral



(Fonte: KAJ Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda., 2013)

Observando os espectros do fosfogesso hemidratado (Figura 4.13) e do gesso mineral (Figura 4.14) na microanálise por EDX, é possível verificar a grande semelhança entre espectros, ratificando os resultados obtidos por CANUT (2006) em

sua análise mineralógica, não só pela composição química das amostras, mas também pela semelhança nos picos dos elementos químicos gerados.

# 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 5.1 CONCLUSÕES

A relação ideal entre a temperatura e o tempo de calcinação do fosfogesso foi a que gerou os corpos de prova com o melhor desempenho quanto à resistência mecânica, ou seja, 159°C e 120 minutos para a sua desidratação e transformação de di-hidrato para hemidrato. Este valor de temperatura foi estabelecido a partir da análise dos resultados de resistência mecânica discutidos no item 4.5.

A quantidade de água necessária estequiometricamente para a reidratação da amostra de fosfogesso, durante a preparação dos corpos de prova, foi de 18,6% em relação à massa de fosfogesso hemidratado.

Quanto aos valores de resistência mecânica, tanto à tração na flexão quanto à compressão em corpos de prova produzidos em fosfogesso hemidratado, para a relação ideal entre a temperatura e o tempo de calcinação, os valores encontrados para a tração na flexão ficaram entre 12,69 e 16,01 MPa, e para a compressão entre 13,89 e 16,03 MPa.

Essa faixa de valores de resistência mecânica para o fosfogesso foi obtida comparativamente ao gesso mineral. Salienta-se que os valores obtidos com os corpos de prova em gesso mineral, com as mesmas dimensões dos corpos de prova em fosfogesso, apresentaram valores da mesma magnitude.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns aspectos que podem aprofundar os estudos para a definição da utilização do fosfogesso como material de construção, e para os quais são necessários estão sugeridos a seguir:



- Avaliação da lixiviação e solubilização dos resíduos provenientes da produção ou demolição dos elementos construtivos confeccionados em fosfogesso beneficiado;
- Avaliação do surgimento de fungos em elementos construtivos produzidos em fosfogesso. Embora nenhum dos corpos de prova desta pesquisa tenha apresentado ocorrência de fungos, mesmo os que foram submetidos aos testes de absorção de água, uma avaliação mais detalhada e específica, onde os corpos de prova sejam submetidos a ambientes propícios ao surgimento de fungos, seria uma grande contribuição para a continuidade desta pesquisa;
- Reciclagem dos resíduos de construção ou demolição de elementos construtivos produzidos em fosfogesso;
- Estudo da resistência às intempéries para amostras em fosfogesso;
- Estudo da resistência à ação de produtos básicos em amostras de fosfogesso.

# REFERÊNCIAS

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, IBRACON/CT- 206 MEIO AMBIENTE. Brasil, São Paulo, junho, 2001. p. 43-56.

AL ATTAR, L.; AL-OU DAT, M.; KANAKRI, S.; BUDEIR, Y.; KHALILY, H.; AL HAMWI, A. Radiological impacts of phosphogypsum. **Journal of Environmental Management**, 2011, Vol.92(9), p. 2151-2158.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45** – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004** – Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 71 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10005** – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 16 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10006** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c. 2 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 10007** – Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d. 21 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12127** – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). Investimentos no Brasil, julho de 2011. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/multimedia/investimentos.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2012.

ALTABA, M. F. **Atlas da mineralogia**. Edição especial revisada para livro Ibero-Americano, Ltda. 5<sup>o</sup> ed. Ediciones. 1980. ISBN 84-7093-172-5.

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**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n. 16, p. 2952 – 2965, 2013.

BALTAR, C. A. M.; BASATOS, F. F.; LUZ, A. B. **CETEM - Centro de Tecnologia Mineral - CT2008-175-00 Comunicação Técnica elaborada para o Livro Rochas Minerais Industriais: Usos e Especificações Parte 2 – Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**, Gipsita, cap. 23, Rio de Janeiro, p. 505- 526, dez. 2008.

BARBOZA, J. S. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009, 101 p.

BARTI, P. E.; ALBUQUERQUE, P. C. W. Alternativas para reciclagem industrial do fosfogesso. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, MG, 1992. Anais, p. 14.

BECKER, P. Phosphate and phosphoric acid: raw materials, technology and economics of the wet process. **Fert. Sci. Technol. Ser.**, vol. 6, pp. 752, 1989.

BITTENCOURT, B. A. et al. Moldagem por Compressão a Frio do Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular. Parte 1: Influência do Tamanho, Distribuição e Morfologia da Partícula na Densidade a Verde. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 3, p. 224-230, 2009.

BORGES, C. A. M.; SABBATINI, F. H. **O conceito de desempenho de edificações e a sua importância para o setor da construção civil no Brasil**. Boletim Técnico

da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/515. São Paulo: UPUSP, 2008.

CAJAZEIRAS, A. P.; CASTILHOS JUNIOR, A. B. Reutilização do fosfogesso na construção civil : aspectos ambientais. Peru - Peru. 1998. 8 p. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, Peru, 1998.

CAJAZEIRAS, A. P.; CASTILHOS, A. B.; MACCARINI, M. et al.. Perspectivas de utilização do fosfogesso na pavimentação de estradas secundárias : aspectos tecnológicos e ambientais. Brasil - Florianópolis, SC. 1998. v.1 p. 857-861. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Florianópolis, 7º, 1998.

CALVO, J. P. Yeso. **Curso Internacional de Técnico Especialista em Rocas y Minerales Industriales**. Ilustre Colégio Oficial de Geólogos, Madrid, 16 p., 2003.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006, 154 p.

CARDOSO, M. L. **Ácido Fosfórico**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/quimica/acido-fosforico/>>. Acesso em: 30/05/2013.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento portland para pavimentação**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004, 242p.

CHEM YQ. Calcium sulfate hemihydrate. Disponível em: <<http://zip.net/bynml1>> <<http://chemyq.com/En/xz/xz1/8864ctvbf.htm>>. Acesso em 20 mai. 2013.

CODEMIG. Disponível em: <<http://zip.net/bhnlZL>> <[http://www.comig.com.br/uploads/imagem/20070817\\_bunge6.jpg](http://www.comig.com.br/uploads/imagem/20070817_bunge6.jpg)>. Acesso em: 17/09/2012.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEM). Diretrizes básicas de radioproteção. (CNEM NE 3.01). 2005.

**COPEBRÁS.** Disponível em: <<http://zip.net/bgnlQN>>  
<[http://www.copebras.com.br/about-us/our-operations/ouvidor.aspx?sc\\_lang=pt-PT](http://www.copebras.com.br/about-us/our-operations/ouvidor.aspx?sc_lang=pt-PT)>.  
Acesso em: 15/10/2012.

COSTA, L. J. P. **Estudo da exalação de radônio em placas e tijolos de fosfogesso de diferentes procedências.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011, 65 p.

CUNHA, A. B.; BARBOSA, M. S. C.; FELISMINO, D. C.; DANTAS, I. C. Consumo da lenha na calcinação da gipsita e impactos ambientais no pólo gesseiro da mesorregião do Araripe - PE. **BioFar - Revista de Biologia e Farmácia**, v. 02, p. 01-21, 2008.

DA ROCHA, C. A. L. **O gesso na indústria da construção civil: considerações econômicas sobre utilização de blocos de gesso.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007, 103 p.

DE AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, v. 25, n. 6/B, p. 1145-1154, 2002.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** EDIPUCRS, 2007.

DEGIRMENCI, N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. **Construction and Building Materials**, August, 2008, Vol.22(8), p.1857(6).

DIÁRIO DO COMÉRCIO: jornal diário. Belo Horizonte: Vale vai investir R\$ 1,25 bilhão - Antiga Fosfertil fará maior aporte de sua história. Publicação de investimento em fertilizantes, 01 de março de 2011.

DIOP, M. B.; NDIAYE, A. A.; NDIAYE, S.; LO, B.; SAKHO, O.; TALL, P. D.; BEYE, A. C.; SOBOYEJO, W. Evaluation of Phosphogypsum as an Alternative of Gypsum in the Fabrication Of CEM II/A-M 32.5 R Portland Cement. **Cement Combinations for**

**Durable Concrete, Theme One: Processing, Materials And Characterisation**, January 2005, pages 31 – 44.

EUROPEAN COMMISSION (EC). Radiation protection 112 – Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate General Environment. Nuclear Safety and Civil Protection. 1999.

FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY. World phosphate deposits. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/007/y5053e/y5053e07.htm>>. Acesso em: 13 mai. 2013.

FATOR BRASIL. Vale adquire ativos de fertilizantes, negócio de US\$ 3,8 bilhões. Disponível em: <<http://zip.net/bxnmyL>> <[http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver\\_noticia.php?not=104321](http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=104321)>. Acesso em: 15 out. 2012.

FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010, 380 p.

FREITAS, B. J. A disposição do fosfogesso e seus impactos ambientais. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, MG, 1992. Anais, p. 325-339.

FIPR - FLORIDA INDUSTRIAL AND PHOSPHATE RESEARCH INSTITUTE. Phosphogypsum and the EPA Ban. Disponível em: <<http://www1.fipr.state.fl.us/PhosphatePrimer/0/684AE64864D115FE85256F88007AC781>>. Acesso em 20 set. 2012.

GARG, M.; MINOCHA, A. K.; JAIN, N. Environment hazard mitigation of waste gypsum and chalk: Use in construction materials. **Construction and Building Materials**, 2011, Vol.25(2), p. 944-949.

HANNACHI, A.; HABAILI, D.; CHTARA, C.; RATEL, A. Purification of wet process phosphoric acid by solvent extraction with TBP and MIBK mixtures. **Separation and Purification Technology**, 15 June 2007, Volume 55 (2), p. 212–216.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **1990 Recommendations of the international commission on radiological protection**. Pergamon Press. Oxford, 1991. (ICRP – 60).

JACOMINO, V. M. F.; BRATVEIT, A.; GOMES, A. M.; YOSHIDA, M. I. Microstructural analyses of phosphogypsum generated by Brazilian fertilizer industries. ***Materials Characterization***, v. 59, p. 365-373. 2008.

JACOMINO, V. M. F.; OLIVEIRA, K. A. P.; TADDEI, M. H. T.; SIQUEIRA, M. C.; CARNEIRO, M. E. D. P.; NASCIMENTO, M. R. L.; SILVA, D. F.; MELLO, J. W. V. Radionuclides and heavy metal contents in phosphogypsum samples in comparison to cerrado soils. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, 2009, Vol.33, p.1481-1488.

JEPSON, R. G.; CRAIG, J. C. The American heritage science dictionary. **The American heritage science dictionary**, 2005.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. **Alternativas da gestão de resíduos de gesso**. Contribuição apresentada à discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307, relativa à gestão do gesso. Julho de 2003.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R. **O fósforo na agricultura brasileira: uma abordagem mínero-metalúrgica**. Série Estudos e Documentos nº 67. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2006, 75 p.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. **Fertilizantes Agroindústria & Sustentabilidade**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, novembro de 2008. 655 p.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; NASCIMENTO, M. **Fertilizantes Agroindustria e Sustentabilidade**. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, p. 81-132, 2009.

LOOKCHEM. Calcium sulfate dihydrate. Chemistry – Molecular Structure. Disponível em: <<http://zip.net/bfnlxG>> <<http://www.lookchem.com/Calcium-sulfate-dihydrate/>>. Acesso em 20 mai. 2013.

LUTHER, S. M.; DUDAS, M. J.; RUTHERFORD, P. M. Radioactivity and Chemical Characteristics of Alberta Phosphogypsum. **Water, Air and Soil Pollution**, vol. 69, 1993. p. 277-290.

LUZ, C. **Comportamento do cimento sulfo-aluminoso (CSA) e da cinza pesada (CZP) no tratamento de resíduos: fosfogesso e lodo galvânico**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2005. 268 p.

LUZ, C.; CHERIAF, M.; ROCHA, J.; AMBROISE, J.; PERA, J. Estudo de um cimento com baixo impacto ambiental (BIA) a partir do clínquer sulfoaluminoso e do fosfogesso. Brasil - Porto Alegre, RS. 2005. **Ambiente Construído**, out./dez v. 5, n. 4 p. 07-27.

LUZ, A. B. et al. Gesso-Mineração São Jorge. **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. CETEM-MCT**, Rio de Janeiro, p. 240-249, 2001.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Gipsita – Sumário Mineral**, p. 80-81, 2004.

LYRA SOBRINHO, A. C. P.; AMARAL, A. J. R.; DANTAS, J. O. C. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Gipsita – Sumário Mineral**, p. 175-178, 2006.

MATOS, T. H. C. **Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011, 118 p.

MAZZILLI, B.; SAUEIA, C. H. R. Implicações radiológicas da utilização de fosfogesso como material de construção. Brasil - São Paulo, SP. 1997. **Ambiente Construído**, jul/dez v. 1, nº 2 p 17-22.

MAZZILLI, B. P.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C.; NISTI, M. B. Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. **Journal of Environmental Radioactivity**, vol. 49, p. 113-122, 2000.



MAZZILLI, B. P.; SAUEIA, C.; SANTOS, A. J. G. Implicações radiológicas do uso do fosfogesso como material de construção no Brasil. Brasil - São Paulo, SP. 2000. p. 131-132. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: PRÁTICAS RECOMENDADAS, 3º, 06 jun 2000.

MAZZILLI, P. BÁRBARA. **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. **e-Xacta**, v. 6, n. 2, 2013.

MESQUITA, G. M.; REZENDE, L. R. Avaliação ambiental da aplicação de fosfogesso em pavimentação. Brasil. In: IV ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 2007, Campo Grande, MS, 2007. p. 82-91.

MF RURAL. Fertilizantes agrícolas - Gesso agrícola. Disponível em: <<http://zip.net/bpnmcR>> <<http://comprar-vender.mfrural.com.br/detalhe/gesso-agricola-96268.aspx>>. Acesso em 17 mai. 2013.

MINAS SUSTENTÁVEL. Meio ambiente, cidades sustentáveis. Disponível em: <<http://zip.net/brnl4M>> <<http://minassustentavel.wordpress.com/2010/02/20/governo-aecio-neves-inicia-pesquisa-que-podera-reduzir-danos-ambientais-em-aterros-sanitarios-uso-de-fosfogesso-vai-diminuir-em-ate-50-volume-de-residuos-solidos/>>. Acesso em 20 set. 2012.

NERI, J. T. C. F. **Caracterização e aplicação da zeólita estilbita para recuperação de dióxido de carbono na queima de gás natural.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005, 139 p.

NUERNBERG, N. J.; RECH, T. D.; BASSO, C. Uso do gesso agrícola. BOLETIM TÉCNICO n. 122. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina S.A (EPAGRI). Santa Catarina: EPAGRI, 2005. ISSN 0100-7416.

NUTRION. Gesso agrícola – A raiz da eficiência. Disponível em: <[http://www.nutrion.com.br/Nutrion\\_Gesso.asp](http://www.nutrion.com.br/Nutrion_Gesso.asp)>. Acesso em 17 mai. 2013.

OLIVEIRA, K. A. P. **Aplicação do fosfogesso na agricultura do Cerrado e suas implicações radiológicas**. Dissertação de Mestrado, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - Comissão Nacional de Energia Nuclear, Belo Horizonte, 2008, 128 p.

OLIVEIRA, S. M. F. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para utilização na construção rodoviária**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005, 190 p.

PAVANIN, L. A.; PARRA, K. N.; SILVA, L. O. Resíduos Industriais: Caracterização e Estudos do Fosfogesso. In: 47º Congresso Brasileiro de Química. Natal, RN, 2007.

PAVINATO, P. S.; ZAVASCHI, E. **Fertilizantes Fosfatados: matérias-primas, obtenção e ação fertilizante**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Departamento de Ciência do Solo, Universidade de São Paulo, Piracicaba, abril de 2013.

PEIXOTO, C. M.; HENKES, J. A. Avaliação do uso do rejeito gerado pelo beneficiamento da Rocha Fosfatada na Agricultura. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 1, n. 1, p. p. 74-122, 2012.

PESQUISA FAPESP. Disponível em: <<http://zip.net/brnl6P>> <<http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/12/10/gesso-resistente/>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

PHOSPHOGYPSUM DISPOSAL AND THE ENVIRONMENT. Disponível em: <<http://zip.net/bnnlN0>> <[http://www.fipr.state.fl.us/pondwatercd/phosphogypsum\\_disposal.htm](http://www.fipr.state.fl.us/pondwatercd/phosphogypsum_disposal.htm)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: avaliação das propriedades para uso em componentes**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011, 330 p.

PINTO, M. M. **Avaliação da implantação de cobertura vegetal em uma pilha de fosfogesso**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007, 88 p.

RABELO, A. P. B.; SOLER, J. G. M.; SILVA, N. C. Utilização do subproduto fosfogesso na construção civil. In: IV SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, IBRACON/CT- 206 MEIO AMBIENTE. Brasil, São Paulo, junho, 2001. p. 195-202.

REIJNDERS, L. Cleaner phosphogypsum, coal combustion ashes and waste incineration ashes for application in building materials: A review. **Building and Environment**, 2007, Vol. 42(2), p. 1036-1042.

RENTERÍA-VILLALOBOS, M.; VIOQUE, I.; MANTERO, J.; MANJÓN, G. Radiological, chemical and morphological characterizations of phosphate rock and phosphogypsum from phosphoric acid factories in SW Spain. **Journal of Hazardous Materials**, 2010, Vol.181(1), p. 193-203.

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

SCHULTZ, J. J.; GREGORY, D. I.; ENGELSTAD, O. P. Phosphate fertilizers and the environment: executive summary. **Agro-Chemicals News in Brief**, v. 14(4), 1991. p. 12-20.

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

SINGH, M.; VERMA, C. L.; GARG, M.; HANDA, S. K. Processing of Phosphogypsum for value Added Building Materials. Recycling and Reuse of Waste Materials, Theme Two: Processing for Use, January 2003, pages 165 – 172.

SKYSCRAPERCITY. Disponível em: <<http://zip.net/brnl6M>> <<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1092095>>. Acesso em: 05 jun. 2013.

SUNKAR RESOURCES. How phosphate fertilizers are produced Disponível em: <<http://zip.net/bpj53v>> <[http://www.sunkarresources.com/en/pages/How\\_phosphate\\_fertilizers\\_are\\_produced](http://www.sunkarresources.com/en/pages/How_phosphate_fertilizers_are_produced)>. Acesso em: 18 mai. 2013.

TAKEDA, M. C.; PARREIRA, A. B. O potencial de misturas de fosfogesso e cimento para uso como material na construção rodoviária. Brasil - São Paulo, SP. 1998. p. 14-31. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 31<sup>a</sup>, São Paulo, 1998.

TAYIBI, H.; GASCÓ, C.; NAVARRO, N.; LÓPEZ-DELGADO, A.; ÁLVAREZ, A.; YAGÜE, L.; ALGUACIL, F. J.; LÓPEZ, F. A. Valorisation of phosphogypsum as building material: Radiological Aspects. **Materiales de Construccion**, 2011, vol.61(304), p.503.

TOMAZ, C. A. The production of phosphoric acid and phosphogypsum by brazilian industries. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE USOS DO FOSFOGESSO, CNEN/CDTN. Belo Horizonte, 2006.

UNITED NATIONS POPULATION FUND (UNFPA). State of world population 2011. People and possibilities in a world of 7 billion. New York, NY.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). The 2000 report to the general assembly with scientific annexes. New York: United Nations, 2000.

USP – Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://zip.net/bcnlzl>> <<http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>>. Acesso em: 11 abr. 2014.

VALE FERTILIZANTES. **Oportunidades para o Fortalecimento da Indústria Brasileira de Fertilizantes**, Araxá, 24 de novembro de 2010.

VAN KAUWENBERGH, S. J. **World phosphate rock reserves and resources**. IFDC, 2010.

VILLAVERDE, F. L. **Avaliação da exposição externa em residência construída com fosfogesso**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008, 65 p.

WIKIMEDIA COMMONS. Phosphogypsum stack located near Fort Meade, Florida. Disponível em: <<http://zip.net/bnnlNR>> <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:GypStack.JPG>>. Acesso em 17 mai. 2013.

WIKIMEDIA COMMONS. Phosphoric acid 3D. Disponível em: <<http://zip.net/blnlgB>> <<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:3-phosphoric-acid-3D-balls.png>>. Acesso em: 01 jun. 2013.

WISSA, A. E. Z. et al. Phosphogypsum disposal and the environment. In: **Proceedings of an International Workshop on Current Environmental Issues of Fertilizer Production, Prague, Czech Republic, June 7-9, 1999**. IFDC-An International Center for Soil Fertility and Agricultural Development, 2002. p. 195-205.

YANG, J.; LIU, W.; ZHANG, L.; XIAO, B. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum. **Construction and Building Materials**, 2009, Vol.23(2), p. 687-693.

ZHOU, J.; GAO, H.; SHU, Z.; WANG, Y.; YAN, C. Utilization of waste phosphogypsum to prepare non-fired bricks by a novel Hydration–Recrystallization process. **Construction and Building Materials**, 2012, Vol.34, p. 114-119.